

기·술·세·선

지역 에너지 원자로 REX-10 개발 연구

Researches for Development of Regional Energy Reactor REX-10

김종원^a, 이연건^a, 주형민^b, 장병일^b, 임성원^a, 류은현^a, 주한규^a, 김무환^c, 박군철^a

a 서울대학교 원자핵공학과

b 한양대학교 원자시스템공학과

c 포항공과대학교 기계공학과

서론

에너지의 효율적 생산과 이용은 자원 빈국인 우리나라에서 경제뿐만 아니라 국가 안보 차원에서도 매우 중요하다. 경제 성장 및 발전에 선행 조건으로서 충분한 에너지의 공급은 필수적이다. 에너지 자원의 한계, 지구 온난화, 산성비와 같은 환경 문제가 대두되고 있고 신뢰성 있는 지역 전력 수요가 급증하고 있다.

이러한 문제들을 해결할 수 있는 현실적인 방안으로, 최근 원자력 발전이 떠오르고 있다. 특히, 전력 생산만을 목적으로 하는 기존 원자로가 아닌 다방면(지역 난방, 해수 담수화, 산업용로의 열공급, 선박 및 로켓 추진)에 이용될 수 있는 중소형 원자로(SMR: Small and Medium Reactor)가 현재 많은 국가에서 개발되고 있다. 1,2,3.

이러한 분위기에 발맞추어 2005년부터 차세대 지역 에너지 연구소에서는 지역 난방 및 소형 전력 생산을 목적으로 하는 소형 ‘지역 에너지 원자로’ REX-10을 개발하고 있다.

REX-10은 대도시 밀집 아파트 단지 등의 인구 밀집 지역 또는 도서 산간에 위치할 소형 원자로이므로 고유 안전성, 핵확산 저항성 및 경제성을 확보하여야

한다.

REX-10은 기존 국내 개발 일체형 원자로인 SMART를 토대로 하였으나, 운전 방식 및 운전 압력, 용량 등은 지역 에너지 원자로에 맞게 결정이 되었다. 고도의 안전성을 확보하기 위하여, 자연 대류 운전, 수조형 원자로 압력 용기 및 저압 운전 등의 개념을 제시하였으며, 핵확산 저항성을 증대시키기 위하여 핵연료의 교체 없이 약 20년의 주기를 가지는 토륨 노심 운전을 고려하였다. 또한 무인 원격 제어 운전 및 건설 단가를 낮춤으로써 경제성을 확보한다.

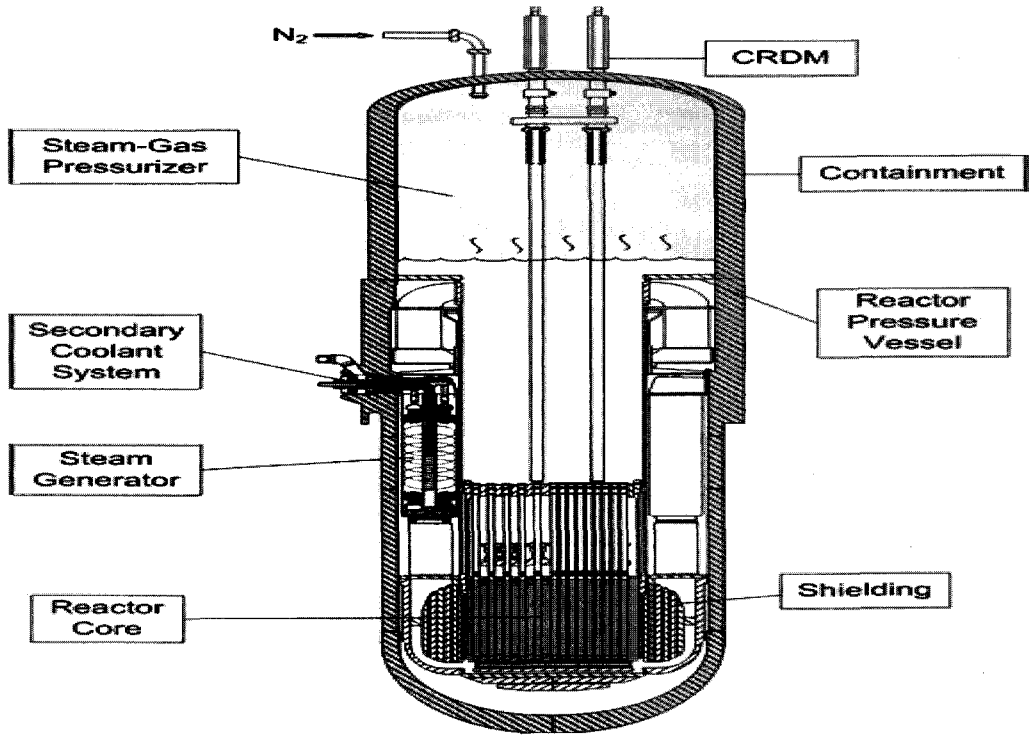
현재 원자력 열수력 및 노심에 관련된 연구를 수행 중이며, 이러한 연구를 통하여 지역 에너지 원자로 REX-10의 계통 및 여러 특성을 파악하고자 한다.

지역 에너지 원자로 - REX-10

REX-10은 <그림 1>에서 보듯이 일체형 형태의 가압경수로이다. 일체형 원자로의 특성상 1차 계통의 전 부분, 노심, 가압기, 증기발생기 등이 원자로 압력 용기 안에 존재한다 5.

이러한 특성 때문에 REX-10에서 대형 냉각재 상실 사고(LBLOCA)는 발생하지 않는다.

SMART 원자로와는 달리 REX-10은 자연 대류



〈그림 1〉 REX-10 개념도

에 의하여 노심의 열이 제거시키기 때문에 원자로 냉각재 펌프가 존재하지 않으며, 기존 상용 가압경수로에 비하여 낮은 압력에서 운전된다.

이러한 자연 대류의 능력을 향상시키기 위하여 노심 윗부분에 높이를 확보하기 위한 라이저(riser)를 설치하였다. 또한 피동 안전성을 향상시키기 위하여 자기 가압 방식의 내장형 증기-가스 가압기를 채택하였고, 이는 초기 가압을 위한 질소와 1차 계통으로부터 나오는 증기의 분압으로 압력이 유지된다. 또한 나선형 증기발생기를 채택하였으며 핵확산 저항성을 만족하기 위하여 REX-10은 토륨 노심을 고려하였다.

지역 에너지 원자로 REX-10은 인구 밀집 지역 또는 도서 벽지 등에 위치하므로 고도의 안전성과 기밀성이 유지되도록 원자로 계통을 설계하여야 한다. 따라서 지역 에너지 원자로로서의 일반적인 설계 특징을 만족시켜야 하며 고도의 경제성이 보장되어야 한다.

이러한 요건을 만족시키기 위한 REX-10의 설계 목표는 다음과 같다.

○ 고유 안전성 확보 : 설계 기준 사고를 배제함으로써 사회적 수용성을 만족시키고 고유 안전성 확보를 위하여 자연 대류, 수조형 압력 용기 및 저압 운전

개념을 제시하였다.

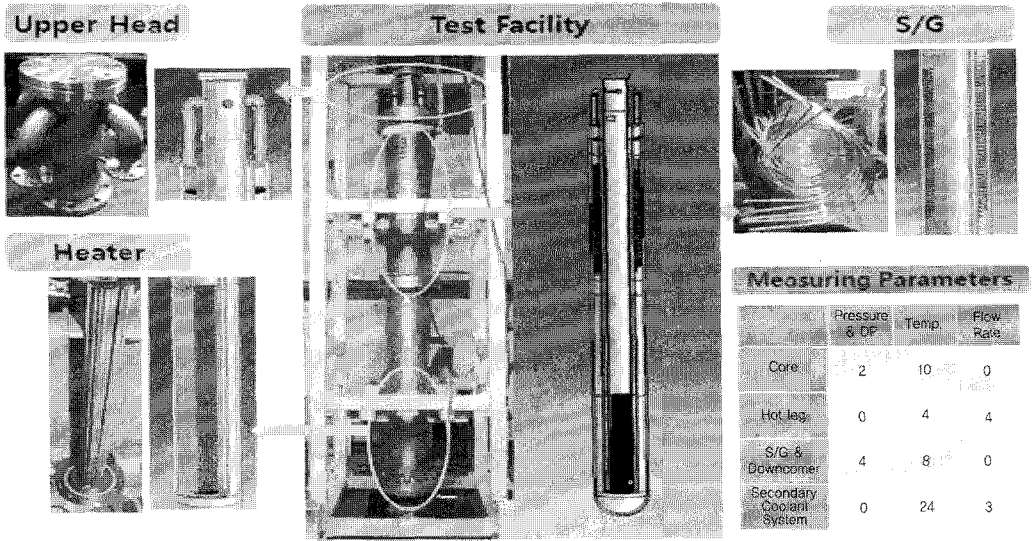
○ 핵비확산 및 핵확산 저항성 확보 : 방사성폐기물을 극소화하고 핵비확산을 보장하기 위해 운전 수명 20년으로 핵연료 교체 없이 원자로 교체 개념을 도입하고 토륨 핵연료를 사용하여 우라늄 사용을 배제하고 나아가 핵연료가 핵무기로 전환할 수 없도록 한다.

○ 경제성 확보 : 건설 및 운영 단가를 타에너지원과의 경쟁력을 갖도록 하기 위해 무인 원격 운전으로 인건비 및 O&M 가격을 대폭 절감하고 신개념 규제 개념을 적극 유도하여 중대 사고 배제 및 EAB 제한 구역 철폐 요건을 확립하도록 하여 부지나 불필요한 보수적 설계를 합리화함으로써 건설 및 제작 비용을 절감한다.

이러한 REX-10은 운전 압력 및 용량이 지역 에너지 원자로에 맞게 결정이 되었다.

러시아 OKBM에서 지역 난방을 위해 개발된 AST-500 원자로는 열출력 500MW로 그 운전 압력이 2MPa이다. 또한 중국의 NHR-5 및 NHR-200의 운전 압력도 2MPa 정도이다.

기존의 사용 원전과는 달리 비교적 낮은 압력에서



〈그림 2〉 REX-10 실험 장치 (RTF)

작동하여 안전성을 향상시켰다. 또한 열출력을 위한 출구 온도 확보를 위해 어느 정도의 압력은 필요하며 이는 증기-가스 가압기를 통하여 제어된다.

또한 전력 공급 용량은 가장 유망한 도서 지역의 공급을 고려할 때, 소동력로의 최소 전력 공급 용량 단위는 약 2MWe가 적절할 것으로 판단한다. 보다 큰 부하의 산업체 시설 등은 2MWe를 기본 단위 용량으로 한 소동력로 모듈을 병렬 연결하여 공급 용량을 증강하는 방법이 보다 효율적일 것으로 생각된다.

열 공급 용량은 가스 엔진을 기준으로 발전 비율을 30%로 가정하고, 배열 사용 비율을 40~50%로 가정할 경우, 2MWe의 전력 공급 용량 단위에 대한 열 공급 용량은 2.7MWth~3.4MWth이 산정된다.

그러므로, 전체 REX-10의 용량은 위의 전력 공급 용량과 열 공급 용량 및 출력 마진 등을 고려해서 열 출력 10MW로 결정되었다.

REX-10 개발 연구

REX-10의 상세 주요 설계 변수는 운전 압력 및 열출력, 그리고 자연 대류 운전 등을 고려하여 결정이 되었다. <표 1>은 REX-10의 상세 주요 설계 변수를 나타낸다.

1. 자연 대류 실증 실험

REX-10의 자연 대류 특성을 연구하기 위하여 RTF(REX-10 Test Facility) 장치를 설계 제작하였다⁶. 실험 장치는 1차 계통 및 2차 계통이 모두 모사되어 있으며 <그림 2>에 RTF 장치를 나타내었다. RTF의 기하학적 구조 및 크기는 Ishii의 척도 해석 방법론을 적용하여 결정하였다⁷.

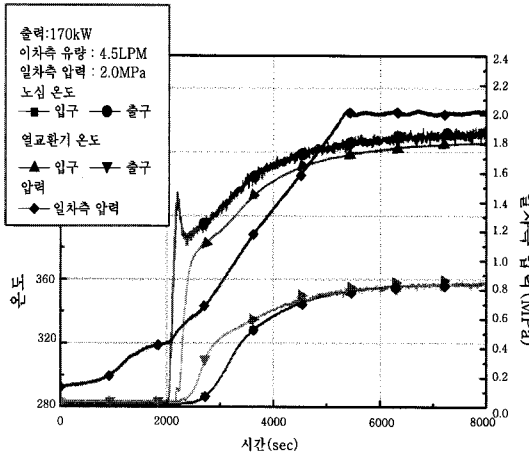
RTF의 1차 계통 루프는 전기 히터, 고온관, 증기 발생기 및 가압기로 구성되어 있다. 전기 히터는 12mm의 지름을 가진 1m 높이의 봉히터로 구성되어 있으며 RTF 아랫부분에 장착되어 있다.

RTF 전기 히터 용량은 최대 200kW이다. 고온관은 라이저와 증기발생기 사이에 위치하는데, 실제 일체형 원자로 REX-10에서는 존재하지 않지만 자연 대류 유량 측정을 위하여 인위적으로 고온관을 만들었다.

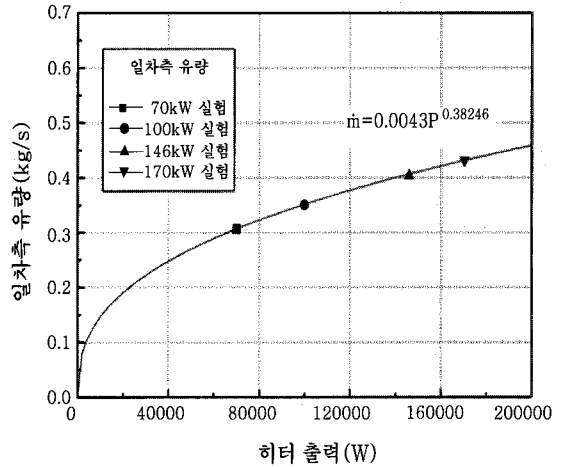
나선형 증기발생기는 12개의 나선형 코일로 구성되어 있으며 각각의 나선형 튜브는 3/8인치 지름에 4m 길이를 가진다.

또한 열손실을 줄이기 위하여 RTF 외부에 전체적으로 단열재를 부착하였으며 실제 실험 결과 약 1~2% 미만의 열손실이 나타나는 것으로 확인되었다.

일반적으로 자연 대류 거동에 영향을 미치는 변수



〈그림 3〉 RTF 실험 결과(출력: 170 kW)



〈그림 4〉 히터 출력에 따른 자연 대류 유량 평가

는 다양하나, 본 연구에서는 히터 출력을 주요 변수로 선정하여 이에 대한 영향을 평가하였다. 히터 출력의 영향에 대해 평가하기 위한 실험 결과는 〈그림 3〉(170kW)에 나타나 있다.

2차측 유량 4.5liter/min, 1차측 압력 20bar (2.0MPa)로 고정시킨 상태에서 히터 출력을 70, 100, 146, 170kW로 변화시키며 실험을 수행하였다.

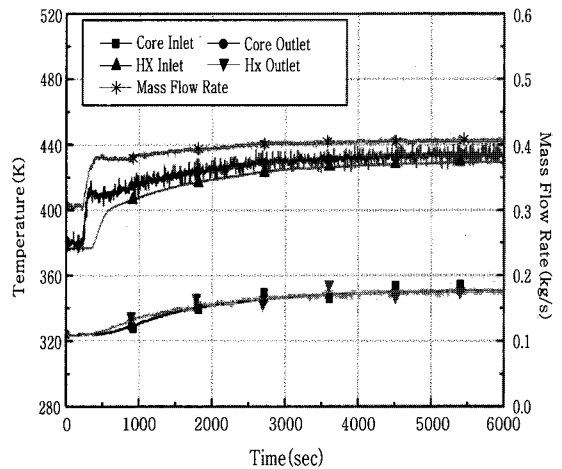
〈그림 3〉은 위의 결과들을 히터 출력에 따른 정상 상태의 자연 대류 유량으로 나타낸 그래프이다. 〈그림 4〉에서 보듯이 자연 대류 유량이 유량 역시 히터 출력이 증가함에 따라 증가하게 되며, 이는 기존의 연구 결과와 일치함을 알 수 있다.

RTF의 과도 상태에서의 자연 대류 거동을 평가하기 위하여 히터 출력 변화를 주요 변수로 선정하여 이에 따른 영향을 평가하였다.

우선 노심 출력이 순간적으로 증가하였을 때, RTF의 거동을 평가하였는데, 실험 결과는 〈그림 5〉와 같다. 출력이 증가하는 순간 노심 출구 온도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 노심 출구에서의 냉각수의 밀도가 더 작아지게 되고, 더 많은 유량이 유발되게 된다.

곧이어 열교환기 입구로 열이 전달되게 되어 온도가 증가되고, 연속적으로 열교환기 출구, 노심 입구로 열이 전달된다.

그리고 출력이 증가됨으로 인해 2차 측 출구 온도

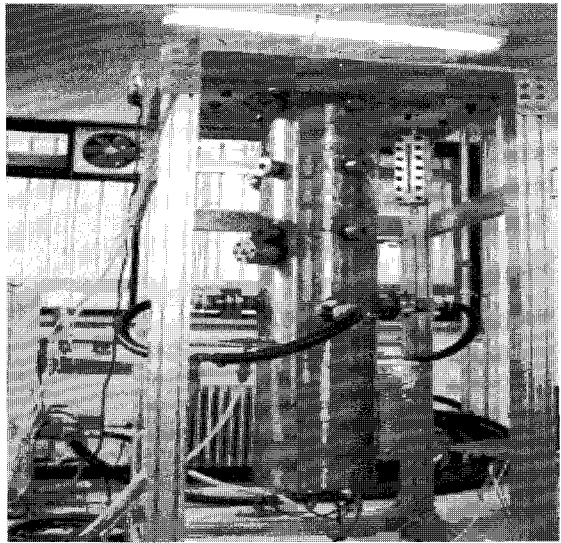
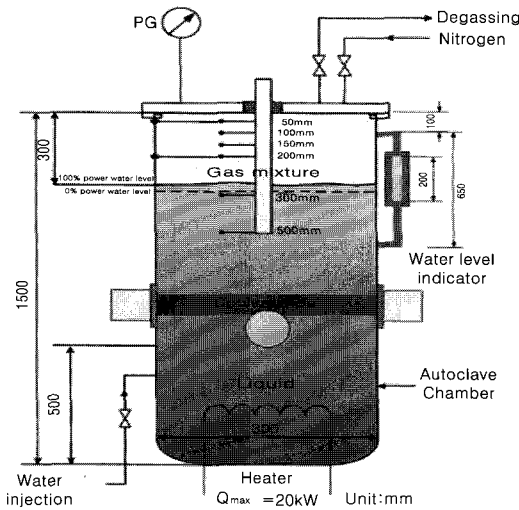


〈그림 5〉 과도 상태 실험 결과(출력 증가)

역시 증가하게 된다. 출력이 감소하였을 경우 출력 증가와는 반대로, 출력의 감소는 1·2차 측 온도 분포를 전반적으로 감소시키는 것을 볼 수 있었다.

2. 증기-가스 가압기 성능 평가

증기-가스 가압기의 구조는 상대적으로 간단하나 내부에서 일어나는 증발 및 벽면 응축과 같은 열수력 현상은 매우 복잡하다. 이에 서울대학교에서는 비응축 가스 존재시의 고압 응축열 전달에 대한 연구를 수행하였고 이 연구를 통하여 응축열 전달 계수 상관



〈그림 6〉 증기-가스 가압기 성능 평가 실험 장치 개략도 및 사진

식을 얻었다⁹⁾.

이 연구 결과를 바탕으로 하여 REX-10 증기-가스 가압기의 열수학적 성능을 평가하기 위하여 〈그림 6〉과 같은 실험 장치를 설계, 제작하였다.

〈그림 7〉은 증기-가스 가압기의 성능 평가 실험 결과를 나타낸다. 이는 질소 질량 분율 30%, 수위가 1,200mm(전체 수위 1,500mm)인 케이스의 결과이다.

이 실험에 앞서 동시에 열출력과 급수 유량을 같이 변동시켰을 때는 정상 상태가 그대로 유지되어 증기-가스 가압기 내부의 온도 및 압력이 거의 변화하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 잉여 열출력 및 열제거 효과를 보기 위하여 약 60초 정도의 시간 차이를 둔 경우의 실험을 수행하였다.

〈그림 7〉은 시간 차이를 두어 잉여 열출력 및 열제거가 존재할 때의 증기-가스 가압기 성능 평가 결과를 나타낸다. 약 20%의 잉여 열출력 및 열제거가 이루어졌을 때 약 0.01MPa 이내의 압력 변화 및 0.1~0.2℃ 정도의 혼합 기체 온도 변화가 나타났다. 이는 비응축 가스가 압력 완충 역할을 하기 때문에 압력 변동 폭이 상대적으로 작음을 알 수 있다.

정상 상태에서의 성능 평가 이외에 급수 파단과 같은 사고 실험 또한 수행을 하였다. 급수 파단과 같은 사고가 나타났을 때 급격히 압력 및 온도가 증가하게 될 때는 응축열 전달의 역할이 클 것으로 판단하였기 때문이다.

〈그림 8〉에서 보듯이 급수 파단을 시킨 이후(60초 지점) 1차 계통의 압력 및 온도가 꾸준히 증가하였다. 그리고 1차 계통의 압력이 고압력 신호 지점인

2.5MPa에 이르러 본 실험 장치를 트립시켰다. 이 때 그림에서 보듯이 압력 최고점을 찍고 서서히 압력이 감소함을 알 수 있는데, 이는 응축열 전달의 특성에 따라 압력이 줄어들게 되는 것이다.

결론적으로 고압력 신호 후 응축열 전달에 의하여 압력이 감소하게 되어 REX-10의 설계 압력인 3.0MPa를 넘지 않게 함을 확인할 수 있었다

3. 토륨 노심

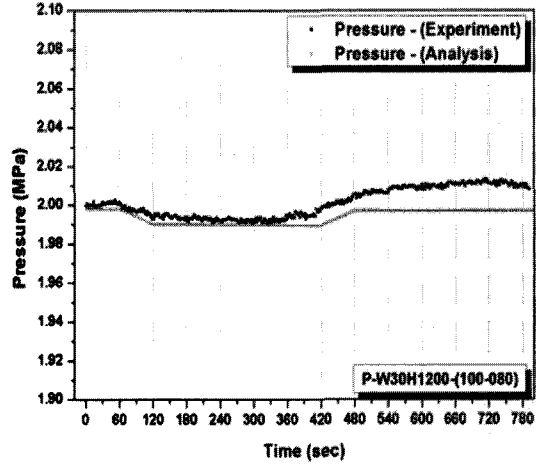
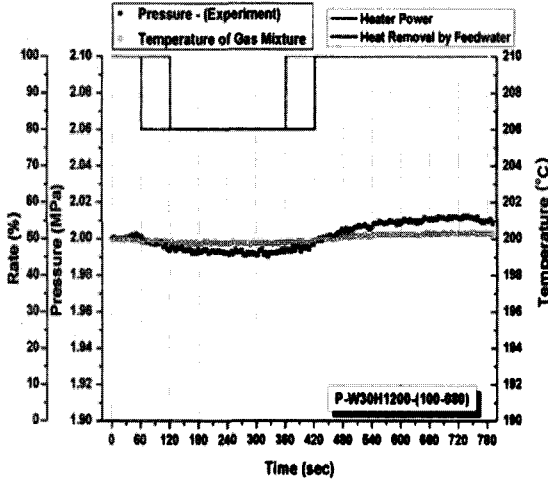
REX-10은 도시 혹은 섬에서 설치되어 강력한 보안 시설 없이 운영되어야 하기 때문에 우수한 안전성과 더불어 탈취 등에 대비한 핵확산 저항성을 지니고 있어야 한다.

이들 요건을 충족하는 원자로를 우라늄만을 연료로 사용하여 제작할 경우, 5년 이상의 초장주기 동안 소요될 원자로의 잉여 반응도를 초기 연료 장전시 확보하여야 한다.

이 경우, 주기 초반에는 주입된 잉여 반응도가 과다하여 원자로를 임계로 유지시키기 위해 필요한 반응도 억제 수단, 즉 가연성 흡수체나 붕산의 과도한 사용이 불가피하다. 또한 고연소도를 초래하는 초장주기 운전의 경우, 플루토늄의 생성이 증대되어 핵비확산 측면에서 불리하게 된다.

이러한 순수 우라늄 사용시의 문제점을 열중성자 증식 성능이 우수한 토륨을 연료로 사용할 경우 극복할 가능성이 있어 토륨 노심 연구를 수행하였다.

REX-10은 2.0MPa의 낮은 압력에서 가용성 붕산



〈그림 7〉 증기-가스 가압기 성능 평가 결과

을 사용하지 않고 가동할 수 있어야 하는 설계 목표를 가지고 있다.

저압의 냉각재 조건에서는 감속재 온도 계수가 약화되는 특성이 있고 무봉산 운전 조건하에서 잉여 반응도 조절은 가연성 독봉과 제어봉으로만 가능하기 때문에 여기에서는 감속재 온도 계수를 증강시키는 방향으로 가연성 독봉을 사용하여 잉여 반응도를 제어하려고 하였다.

가연성 독봉의 재료에는 Gadolinia(Gd_2O_3)와 Erbium(Er_2O_3)를 들 수 있다. Erbium은 Uranium과 높은 화학적 친화력을 지니며, Gadolinium과 달리 Uranium에 함께 사용되었을 때 녹는 점이 낮아지지 않는다.

따라서 우라늄의 농축도를 줄일 필요가 없이 바로 연료봉에 사용할 수 있다는 장점을 가지며, 0.5eV에서 공명 영역을 가지기 때문에 감속재 온도 계수를 향상시키는 효과가 있다.

또한 주기 초 잉여 반응도 억제량이 Gadolinium보다 작고, 주기 말 잉여 반응도 억제량이 Gadolinium보다 높아, 비교적 Reactivity Swing이 적은 노심에 사용하기 적합하다. 따라서 여기에서는 Erbium을 가연성 독물질로 사용하기로 하였다.

토륨을 사용하는 노심의 설계에는 SBU(Seed and Blanket Unit) 방식이 있다. SBU 방식은 초임계 상태인 Seed와 미임계 상태인 Blanket으로 핵연료 집합체를 구성하는 것으로, 재장전 과정이 없을 때 유리하다.

SBU 방식 역시, 다양한 배치와 조성이 가능하기 때문에, 변수를 최소화하기 위해 토륨과 우라늄의 비율, 농축도, 반지름, Pitch를 균질 집합체를 분석하였다.

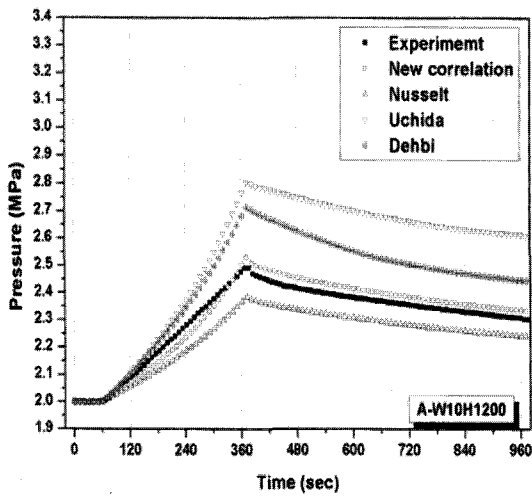
REX-10 구조	
압력 용기 외경	2,272 m
노심 입구 지름	1,607 m
압력 용기 높이	4,635 + 1,545 m(가압기)
1차계통	
운전 압력	2.0 MPa
설계 압력	3.0 MPa
노심 입/출구 온도	165 / 200°C
냉각재 유량	64.9 kg/s
가압기 체적	2,575 m ³
2차계통	
급수 유량	4.25 kg/s
급수 온도	100.0°C
증기발생기(나선형)	
튜브 지름	15mm / 19mm
튜브 개수	250
평균 코일 지름	1,736 m
전체 열전달 면적	175.0m ²

〈표 1〉 REX-10 주요 설계 변수

이렇게 변수 값을 생산한 후에는 SBU 방식에서 배치 및 조성만을 변수화 할 수 있어 이후 어븀의 양, 배치 등을 결정하여, 최종적인 설계안을 도출하였다.

4. REX-10 안전 계통

REX-10은 지역 에너지 원자로의 특성상 안전성



〈그림 8〉 증기-가스 가압기 사고 실험 결과(급수 차단)

〈표 2〉 최종 토륨 노심 구성

출력	10 MWth
집합체 갯수	37
노심 단면적	0.9603 m ²
노심 높이	0.8 m
출력 밀도	13.02 kW/liter
냉각재 플럭스	65 kg/m ² sec
노심 압력	2.0 MPa

집합체								
집합체 간극		높이	갭 간격			핀 갯수	집합체 형태	
13.9994 cm		80 cm	0.0854 cm			81	불완전 토륨 centered	
Seed Rod			Blanket Rod			Guide Tube		
펠릿 반경	피복재 안쪽 반지름	피복재 바깥쪽 반지름	펠릿 반경	피복재 안쪽 반지름	피복재 바깥쪽 반지름	안쪽 반지름	바깥쪽 반지름	
0.5525 cm	0.5618 cm	0.6259 cm	0.5525 cm	0.5618 cm	0.6259	0.5709cm	0.6130cm	
조성		농축도	조성		농축도	Cell Pitch : 1.5460cm		
UO ₂ (89.20575%) +ThO ₂ (9.91175%) +Er ₂ O ₃ (0.8825%)		20w/o	UO ₂ (10.0%) +ThO ₂ (90.0%)		20w/o			

확보가 필수적이다. 이러한 안전성을 확보하기 위하여 일체형 원자로, 피동 계통, 지하 수조 등의 개념을 제시하였다.

이것 외에도 몇 가지의 안전 계통들이 붙어 있어 노심의 손상 및 전체 계통의 과압을 방지한다. 〈그림 9〉는 REX-10의 안전 계통 개념도이다. REX-10 안전 계통은 다음과 같다.

- 피동 잔열 제거 계통(Passive Residual Heat Removal System : PRHRS)

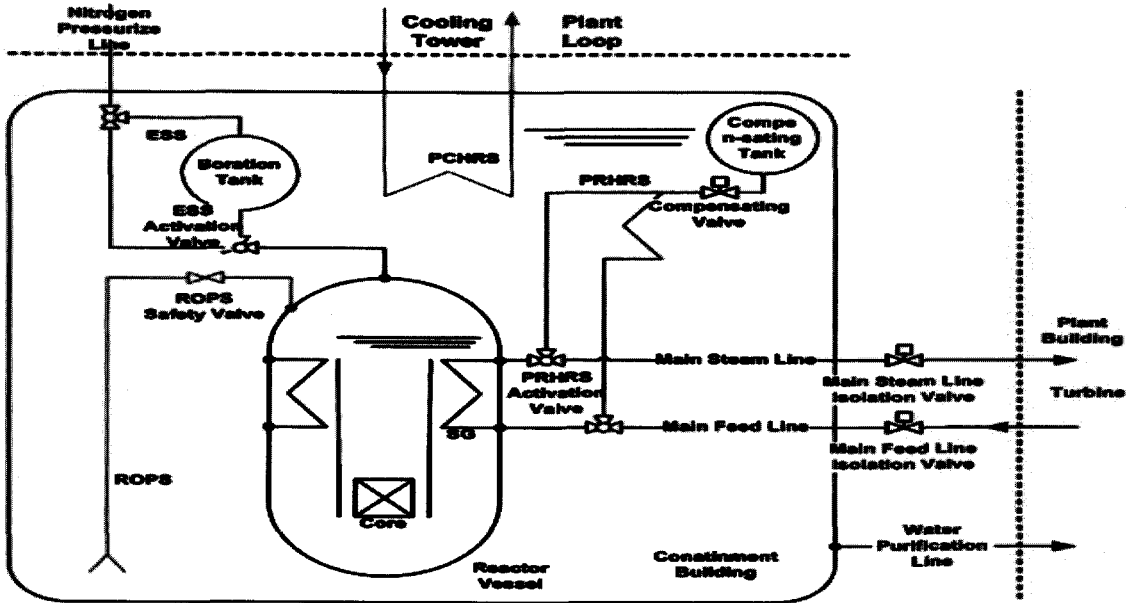
피동 잔열 제거 계통은 원자로 정지 후에 발생하는 노심의 열과 운전 중에 저장된 열을 정상적인 증기 방출 또는 급수 공급을 통해 제거하는 것이 불가능할 경우, 자연 순환을 통해 제거한다. 이와 더불어 원자로 보수나 핵연료 재장전과 같이 장시간 원자로를 정지시켜야 하는 경우에도 작동시켜, 노심의 잔열을 제거한다.

피동 잔열 제거 계통은 원자로 정지 후에 발생하는 붕괴열과 원자로 및 구조물에 저장된 열을 충분히 제거할 수 있어야 한다. 또한 운전원의 조치 없이 72시간 동안 노심의 열 제거 기능을 수행할 수 있도록 한다.

- 원자로 과압 보호 계통(Reactor Overpressure Protection System : ROPS)

원자로 과압 보호 계통은 원자로의 내부 압력이 설계 압력을 넘는 사고가 발생할 경우, 이를 감압시켜 원자로의 건전성을 유지한다. 이 과정은 과압 만큼의 증기를 격납 수조로 방출함으로써 이루어지며, 이 과정을 통해 유출된 방사성 물질은 수조 정화 계통을 통해 제거한다.

설계 기준 사고 및 설계 기준 초과 사고가 발생하더라도, 1차 계통을 포함한 원자로의 내부 압력을 설계 기준 압력 이하로 유지시킨다.



〈그림 9〉 REX-10 안전 계통 개념도

• 긴급 정지 계통 (Emergency Shutdown System : ESS)

원자로 정지가 필요한 상황에서 제어봉이 제대로 작동하지 않을 경우, 봉산수를 직접 주입함으로써 노심을 정지시킨다. 원자로에서 제어봉이 제대로 작동하지 않을 경우, 질소 가압 계통을 통해 봉산수를 직접 주입함으로써 노심을 미임계 상태로 유지한다.

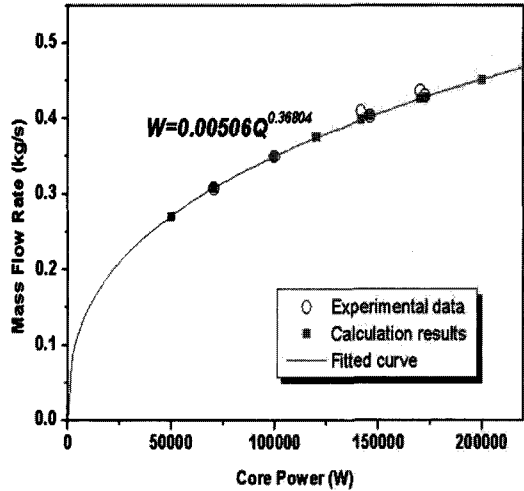
• 피동 격납 수조 열 제거 계통 (Passive Containment Heat Removal System : PCHRS)

격납 수조는 피동 잔열 제거 계통의 열 제거원이면서 사고가 발생했을 경우, 그 심도를 완화시켜주는 역할을 담당한다. 그러므로 격납 수조의 물은 이를 대비해 일정 온도 이하로 유지시킬 필요가 있다. 이를 위해 피동 격납 수조 열 제거 계통은 원자로의 운전 혹은 정지시에 원자로에서 전달된 열을 격납 수조에서 제거한다.

5. REX-10 해석 코드 개발

본 연구에서는 REX-10의 시스템 열수력 해석을 위한 코드가 개발되었다. 노심, 나선형 증기발생기 등의 모델을 삽입하여 momentum integral model을 기반으로 하였다. 개발된 코드를 검증하기 위해서 상기에서 언급된 모델과 수치 해법이 RTF(REX-10 Test Facility)에 적용되었다.

〈그림 10〉, 〈그림 11〉은 RTF의 정상 상태 및 과도 상태를 계산한 값이다.

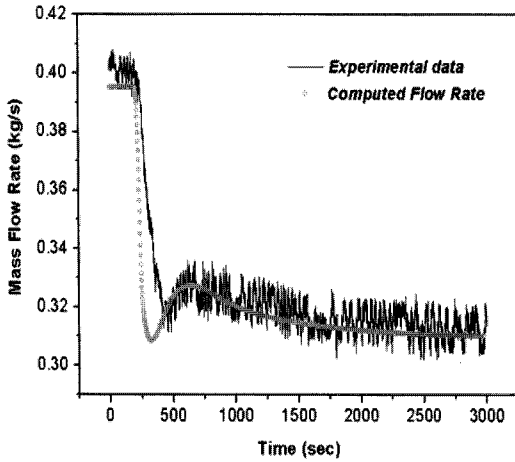


〈그림 10〉 정상 상태에서의 출력과 자연 대류 유량 관계

〈그림 10〉에서 보듯이 노심 출력이 클수록 질량 유량도 커지며 그림에서 확인할 수 있듯이 개발된 코드가 자연 대류 유량을 훌륭하게 예측할 수 있음을 볼 수 있다. 또한 〈그림 11〉에서 보듯이 출력이 감소하자 유량이 가파르게 감소하였다가 새로운 정상 상태를 찾아감을 볼 수 있다.

드의 계산 결과에서 질량 유량이 더 빠르게 변하는 것을 볼 수 있는데 이는 코드가 구조물에서 나오는 열을 고려하지 않고 있기 때문으로 판단된다. 즉 실제 실험에서는 노심 출력이 떨어지더라도 구조물에서 나오는 열이 있기 때문에 상대적으로 출력 감소에 의한 효과가 덜 민감하게 된다.

온도 결과에서는 노심 출력이 감소하면서 노심 출



〈그림 11〉 출력 감소시 자연 대류 유량 변화

구 온도에 즉각적으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있으며 그 후에는 온도 변화를 일정하게 유지하면서 서서히 감소하며 새로운 값으로 수렴함을 확인할 수 있다. 두 그래프에서 개발된 코드가 노심출력이 감소하는 과도 상태에 대해서도 시스템을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

결론

21세기에 특히 개발도상국에서는 점진적 에너지 소비는 불가피해 보인다. 이에 본 연구에서는 새로운 형태의 에너지 공급원인 지역 에너지 원자로 REX-10을 제안하였다.

지역 에너지 원자로에 맞는 설계 목표 및 특성을 제안하였으며, 기존 상용 원자로와는 다른 특징을 가짐을 보여주었다. 더 나아가 REX-10의 근간 기술인 자연 대류, 증기-가스 가압기, 토륨 노심 등에 대한 실험 및 해석 연구는 향후 일체형 원자로 및 향후 구역/지역 에너지를 공급하는 시스템으로 설계할 수 있는 기초 기술로서 기여할 수 있을 것이다. ☉

이 연구는 지식경제부의 재원으로 기초전력연구원의 전력산업연구개발사업 “소동력으로 기반 다목적 지역에너지 시스템 개발 연구”를 통하여 지원받았음. (연구과제 관리코드 : R-2005-B-100)

<참고 문헌>

[1] IAEA-TECDOC-965, Design approaches for heating reactors, IAEA (1994)

[2] INNOVATIVE NUCLEAR REACTOR DEVELOPMENT, IAEA (2002)

[3] IAEA-TECDOC-1056, Nuclear heat application: Design aspects and operating experiences, IAEA (1998)

[4] M. Chang et al., Basic Design report of SMART, Korea Atomic Energy Research Institute (2002)

[5] J. W. Kim et al., “Design Features of Regional Energy Reactor, REX-10,” Proc. of Spring KNS, Jeju, Korea (2009)

[6] B. I. Jang et al., “Experimental study on natural circulation in REX-10 test facility,” Proc. of Spring KNS, Jeju, Korea (2009)

[7] M. Ishii and I.Kataoka, Similarity Analysis and Scaling Criteria for LWRs Under Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation, NUREG/CR-3267, ANL-83-32 (1983)

[8] Yoram Zvirin, A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems, Nuclear Engineering and Design 67 (1981) pp. 203-225

[9] J. W. Kim, Y. G. Lee, H. K. Ahn, G. C. Park, Condensation Heat Transfer Characteristic in the Presence of Noncondensable Gas on Natural Convection at High Pressure, Nuclear Engineering and Design 239 (2009) 688-698

[10] J. W. Kim, Y. G. Lee and G. C. Park, Numerical Analysis on Transient of Steam-gas Pressurizer, Proceedings of the International Youth Nuclear Congress 2008, Interlaken, Switzerland (2008)

[11] J. J. Jeong et al., Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.1. Annals of Nuclear Energy, Vol. 26 (18) (1999) pp. 1611-1642

[12] N. E. Todreas, M. S. Kazimi, Nuclear Systems II: Elements of thermal hydraulic design, Hemisphere Publishing Corporation, New York (1990)