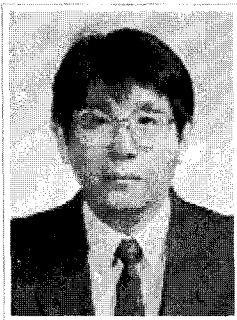


고열 부하 시험 시설 'KoHLT-1'

홍 봉 근

한국원자력연구원 원자로시스템개발본부
핵융합공학기술개발부 부장



서울대 원자핵공학과 졸업
KAIST 석사, 박사(물리학)

Institute for Fusion Studies, The
University of Texas at Austin,
U.S.A./Research Fellow
Associazione EURATOM-ENEA
,Italy/Research Associate
한국원자력연구소(1990~)

개발 경위

핵융합로나 GEN-4 원자로와 같은 미래형 원자로에서는 플라즈마나 방사선에 의해 고열부하를 받게 되어 이를 극복할 수 있는 내열 부품의 개발이 필수적이다.

또한 위성 발사체 개발, 항공기나 유도 무기의 추진체 개발, 신소재 개발 등 항공 우주 분야, 국방 분야, 기계 분야 등에서도 내열 부품의 개발이 필요하다.

이들이 받는 열부하의 크기는 < 표 1>과 같이 보통 0.1 MW/m²에서 크게는 100 MW/m² 이상에 이른다.

핵융합로의 경우, 일차벽(First wall), 디버터(Divertor) 등과 같이 고온의 플라즈마와 근접한 대면재(Plasma facing component)들은

운전 중 플라즈마로부터 ~ 10 MW/m² 까지의 열부하와 수 MW/m²의 고속중성자(14 MeV) 조사를 받게 되어 표면 온도가 거의 1000 °C 이상 올라갈 수 있다.

핵융합로 개발을 위해서는 이러한 가혹한 운전 조건에서 플라즈마 대면재들이 동작할 수 있도록 재료의 개발, 부품의 제작 및 검사 기술 개발이 필요하다.

이들은 고온에서 사용될 수 있도록 열전도성이 좋은 재료와 접합하여 높은 열부하를 제거하게 되고, 따라서 특성이 다른 재료들에 대한 접합 기술은 고열 부하, 고방사선 조건에서 운전되는 핵융합로나 미래형 원자로의 설계 및 제작에서 매우 중요한 기술로 평가되고 있다.

선진 7개국(EU, 일본, 러시아, 미국, 중국, 인도, 한국)이 참여하

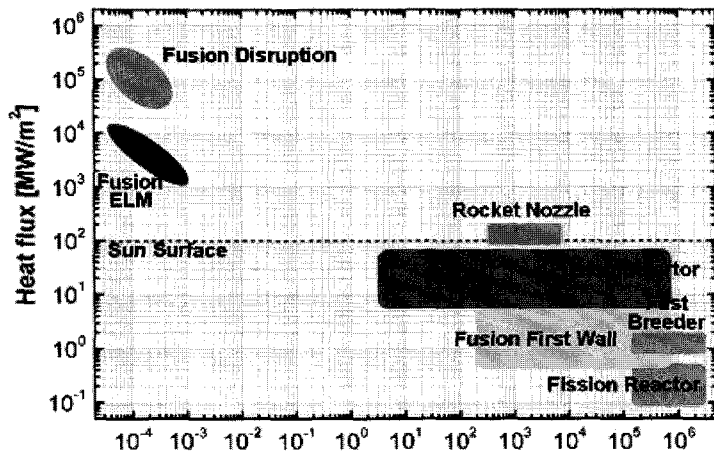
<표 1> 고열부하시험 시설 현황

열원	시설명	기관명(국가)	출력 [kW]	최대 열유속 [GW/m ²]	최대 시험면적 [m ²]
Electron Beam	JUDITH-1	FZJ (독일)	60	15	0.01
	JUDITH-2	FZJ (독일)	200	10	0.5
	FE200	CEA (프랑스)	200	60	1
	EB1200	SNL (미국)	1200	10.6	0.27
	EBTS	SNL (미국)	30	9.5	0.01
	TSEFFY	Efremov (러시아)	200	10	0.25
Graphite Heater	EDA-BETA	Brasimoro (이탈리아)	100	0.0008	0.2
	BESTH	NRI (체코)	50	0.0007	> 0.25x0.08
	KoHLT-1	KAERI (한국)	40	0.0007	> 0.25x0.08

여 건조중인 국제핵융합실험로 (ITER)의 경우 일차벽은 플라즈마와 마주하는 대면재로 베릴륨 (Beryllium), CuCrZr, 및 SS316LN 을 서로 접합하여 사용하는 설계를 채택하고 있다.

베릴륨은 높은 열전달 계수, 적은 삼중수소 보유량 등으로 핵융합로의 일차벽 대면재로 적합하지만, 산화되기 쉽고 거의 모든 원소들과 Inter-metallics를 형성하므로 접합이 매우 어렵다.

ITER의 운전 특성은 1,000초까지의 플라즈마를 유지하는 실험의 반복으로 일차벽은 표면에서의 반복되는 열충격을 견딜 수 있도록 설계되고 제작되어야 한다.



<그림 1> 열부하 비교도

따라서 설계 및 재료의 선정 그리고 제작 방법에 대하여 고열부하를 고려하는 연구가 필수적이다.

고열부하하에서 다른 재료들 간

의 접합부가 취약하게 되므로 접합부가 장시간 견딜 수 있는 제작 기술이 필요하고 ITER에서는 HIP (Hot Isostatic Pressing) 방법이

●●● 기술 개발

의한 제작법을 채택하여 개발이 진행 중이다.

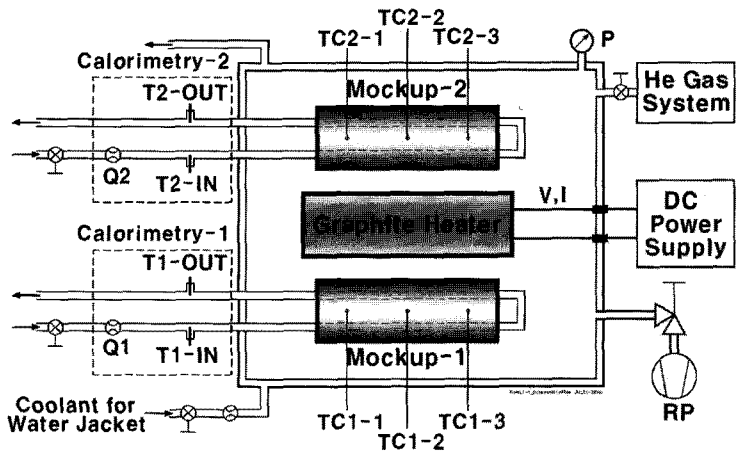
이러한 제작 기술에 의해 제작된 일차벽은 ITER 환경하에서 플라즈마와 최근접 거리에서 그 건전성을 유지해야 하기 때문에, 유사한 환경에서의 시험을 통해 접합부의 건전성을 입증하는 고열부하 시험이 반드시 선행되어야 한다.

한국원자력연구원은 2004년부터 ITER 일차벽에 대해 접합 기술을 포함하는 제작 기술과 비파괴 검사 기술들을 개발해 오고 있다.

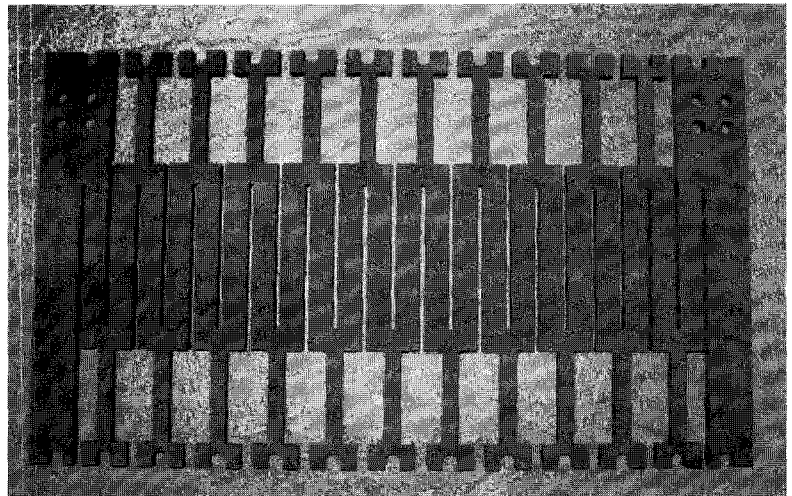
베릴륨, CuCrZr, SS316LN가 접합된 일차벽의 시편들을 제작하고 접합계면에서의 미세 조직 분석, 인장 시험, 사파 충격 시험, 전단 시험, 파괴 인성 시험, 파면 관찰 등의 기계적 특성 평가 시험과 비파괴 검사에 의한 결함 검사를 통해 최적 접합 조건을 도출하고 있다.

또한 접합면의 성능 검증을 위해 실제 운전 환경이 될 ITER와 같이 표면으로부터의 고열부하가 인가될 경우에 대한 고열부하 시험을 위해 고열부하 시험 시설의 개발을 착수하였다.

고열부하 시험은 <표 2>에 정리한 바와 같이 저에너지(100 keV 이하) 전자빔 혹은 Graphite heater를 이용하여 수행하고 있으나, ITER의 일차벽과 같이 독성이 있는 베릴륨 접합 시편을 시험할 수 있는 시설은 독일, 미국, 러시아



<그림 2> KoHLT-1 구성도



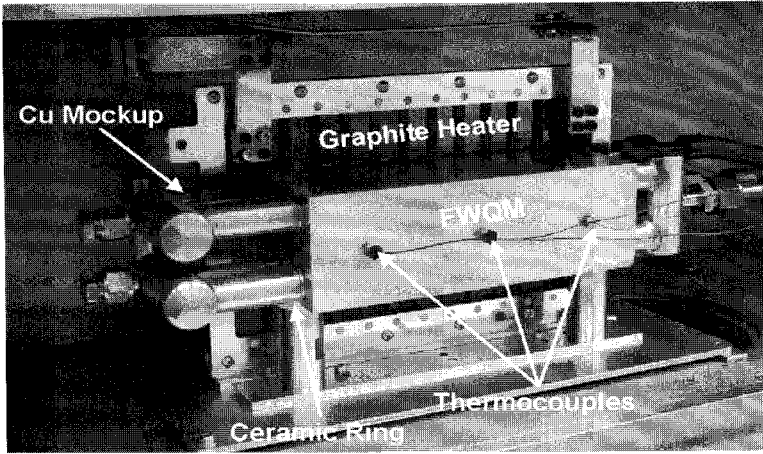
<그림 3> Graphite heater

시설에 국한되어 있다.

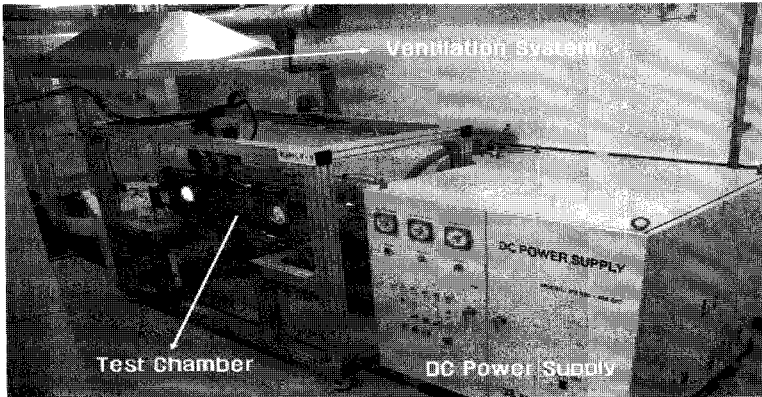
전자빔을 이용하는 장비들은 높은 열부하를 인가할 수 있으나, 새로이 구축하기에 소요되는 기간이 3년 이상으로 길고 구축 비용도 30억 원 이상으로 예상되는 고가이다.

한국원자력연구원에서는 ITER

일차벽 시편의 시험을 위해 러시아와 독일의 시설을 이용한 적이 있지만 이용 비용도 고가이고(ITER 일차벽 Be/CuCrZr/SUS316LN 시편의 경우, 10,000 cycle 시험시 약 100,000 US \$ 소요), 원하는 시기에 이용할 수 없으며, 이용을



<그림 4> 시험용기 내부



<그림 5> 베릴륨 실험실에서 운전중인 KoHLT-1

위한 계약 및 준비 기간이 너무 긴 단점이 있었다.

이러한 문제와 ITER 일차벽 시험 검증 시험의 시급성을 고려하여, 한국원자력연구원에서 우선 가능한 자원으로 Graphite heater를 이용한 고열부하 시험 시설인 KoHLT-1(Korea Heat Load Test facility-1)을 우선 구축하였다.

연구원 내에 구축된 인프라(전

원, 냉각 계통, Be 시설 등)와 기존 시설(진공 용기, 진단 계통, 자료 획득 계통 등)들을 이용하고, 관련 인적 자원과 축적된 경험들을 활용하였다.

KoHLT-1은 ITER의 일차벽 시험의 경우(80 mm×240 mm 단면적), 검증시험에 필요한 0.7 MW/m²의 열부하를 인가할 수 있도록 제작되었고, 시험 경험을 바탕으로 향

후 소요 자원이 확보되는 대로 더 높은 열부하가 가능한 저에너지 전자 가속기를 이용하는 시설로 확충할 계획이다.

개발 시스템 구성 및 기능

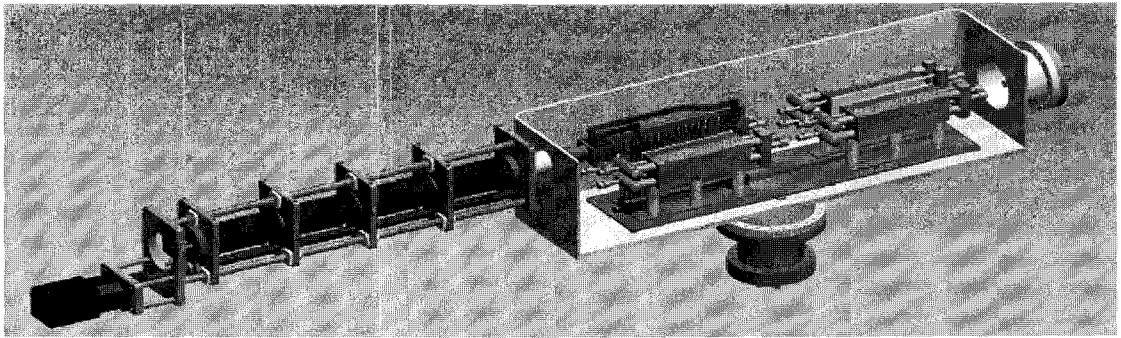
KoHLT-1은 냉각을 할 수 있는 Box-type의 시험 용기 내에(118cm×29cm×32cm) Graphite heater(R8710)로 시험 시편에 열부하를 인가하는 구조이다(<그림 2> 참조).

<그림 3>의 Graphite heater는 시험 시편의 크기에 맞추어 제작할 수 있으며 ITER 일차벽 검증 시험의 경우 유효 가열 면적은 244mm×80mm으로 동시에 두 개의 시편을 동시에 시험할 수 있는 구조이다(<그림 4> 참조).

Graphite heater의 전원은 자동 제어 가능한 200V, 400A 직류 전원을 사용하고 진단 계통으로 K-type thermocouple, 원격 제어용 CCD 카메라, USB 데이터 획득 장치, 열부하 측정용 냉각수 유량계와 온도계(입구/출구)로 구성되어 있다.

전체 계통은 <그림 5>와 같이 베릴륨 취급 실험실 내에 설치하여 운영중이다.

본 시설을 개발, 구축함에 있어 순수 국내 기술을 이용하였으며, 그 성능은 유럽의 유사한 시험 시설(BESTH)에 비해 효율성 면에서



<그림 6> KoHLT-1U

뛰어나다.

BESTH는 오로지 ITER 일차벽 검증용 시편을 시험하기 위한 시설인 반면 KoHLT-1은 다양한 형태의 부품을 시험할 수 있도록 개발되었다.

또한 3개월의 장시간이 소요되는 시험 시간을 40% 이상 단축시킬 수 있으며, 시험 조건 또한 보다 가혹한 환경이 가능하다.

현재까지 ITER 일차벽 접합부의 건전성 시험을 위해 KoHIT-1을 이용하고 있고, 일차벽 검증용 시편 2개(244 mm×80 mm)에 대해 0.65 MW/m²의 열부하로 3,000회 이상의 반복 시험을 성공적으로 수행하였고, 보다 작은 크기의(110 mm×36 mm) 시편 6개에 대해서는 1.5 MW/m²의 열부하로 1,100회 이상의 반복 시험을 성공적으로 수행하였다.

이러한 고열부하 시험은 ANSYS-CFX와 ANSYS를 이용한 사전 해석을 통해, 냉각 조건, Cycle 수, 가열 및 냉각 시간 등의

시험 조건들을 결정하고, 이로부터 예상되는 온도 분포, 시간에 따른 온도 변화, 응력 및 변형 등을 도출하고, 추후 실험 결과와의 비교를 통해 시험 결과의 신뢰성을 확인하는 순서로 진행된다.

향후 전망

KoHIT-1의 구축을 통해 지금까지 해외 시설에 의존하던 고열부하 시험을 국내에서 수행할 수 있게 되어 막대한 외화와 시간을 절약할 수 있게 되었다.

또한, KoHIT-1은 베릴륨을 사용하는 내열 부품의 고열부하 시험이 가능하여 앞으로 외국으로부터 시험 수주를 받아 외화 획득도 가능할 것이다.

ITER 프로젝트에서 우리나라의 조달 품목 중 하나인 일차벽 제작을 위해서는 약 50cm×120cm 크기의 Semi-prototype까지 고열부하 시험이 요구된다.

이를 위해 시험 용기 교체, Heater

구동 계통 설치, 장시간 운전을 위한 전원 보강, 냉각 계통 보완 등 시설을 개선한 <그림 6>의 KoHLT-1U 구축 작업이 진행중이다.

현재 공학 설계를 완료하고, 구동 계통, Feedthrough, Heater frame, Joint 등 부품 설계와 제작을 진행중이다.

KoHLT-1U 구축시, Graphite heater를 이동하여 가열/냉각함으로써 Heater의 수명 연장과 함께 열부하 시험 시간을 단축시킬 수 있고 4개의 시험 시편에 대해 동시에 시험이 가능하게 된다.

또한 한국원자력연구원에 구축한 KoHLT 시설은 핵융합 분야 외에도 미래형 원자로로서 기술 개발이 되고 있는 고온가스로 분야의 발전용 가스 터빈 블레이드, 초내열 합금 용접 및 접합성 검증과 내열 성능 향상 기술 개발, 차세대 원자로 열교환기 성능 검증, 기계, 항공, 우주, 국방 분야의 신재료 개발 등 내열 부품들의 시험에도 활용이 가능하다. 