

ITER 일차벽의 Cu/SS Mock-up에 대한 고열부하 시험

이동원* · 배영덕 · 홍봉근 · 이종혁 · 박정용 · 정용환

한국원자력연구소, 대전 305-600

(2006년 3월 9일 받음)

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 조달용 일차벽의 제조 건전성을 검증하기 위해서, 일차벽을 구성하는 Cu/SS mock-up을 제작하여 고열부하 시험을 수행하였다. Cu/SS mock-up은 CuCrZr과 SS316L이 사용되었으며, 두 금속은 1050 °C, 150 MPa의 조건에서 고온등방가압법 (HIP, Hot Isostatic Pressing) 과정을 통해 접합되었다. 시험에 사용된 고열부하 장치는 일본 원자력연구소의 JEBIS (JAEA Electron Beam Irradiation Stand)를 이용하였으며, 시험 조건은 FEM 코드인 ANSYS 해석을 통해 결정하였다. 시험은 5 MW/m²의 고열부하를 15초간 인가하고, 30초간 냉각하는 방법으로 수행되었으며, 시험 종료 후 얻어진 시험결과와 해석결과가 잘 일치함을 확인하였다.

주제어 : ITER 일차벽, 고온등방가압법, Cu/SS mock-up, 고열부하 시험

1. 서 론

ITER의 일차벽(First Wall)은 플라즈마와 맞닿아 있는 중요한 구조물이며, 따라서 높은 열부하와 중성자 조사를 받게 된다. 이러한 일차벽은 그림 1과 같이 구성된다. 플라즈마 차폐체로서 베릴륨(Be)을 사용하며, 효과적인 냉각을 위한 구리합금, 구조물로 사용되는 스테인레스강으로 구성된 접합체를 사용하게 된다. 이러한 이종금속들의 접합체로 이루어지는 일차벽을 제조하기 위해서는 고온 고압 상태에서 압력을 가하는 고온등방가압법(HIP) 과정이 주로 사용되고 있으며, 현재 최적의 접합조건을

찾기 위한 여러 연구가 진행 중에 있다. 제작 및 ITER에 조달하게 될 일차벽의 건전성을 검증하기 위해서는 고열부하를 조사하는 시험이 필요하며, 본 연구에서는 최종적으로 제작될 Be/Cu/SS로 이루어진 ITER 일차벽의 제작 및 품질 검증에 앞서, Cu/SS mock-up을 제작하여 고열부하를 인가하는 시험을 수행하였다. 시험 조건의 선정 및 실험 결과와의 비교를 위해 ANSYS를 이용한 예비 분석도 함께 수행하였다.

II. 고열부하 시험용 Cu/SS mock-up 제조

고열부하 시험용 Cu/SS mockup은 Cu 합금층에 냉각수를 흘리기 위한 스테인레스강(SS) 파이프를 포함하고 있기 때문에 canning 및 HIP 과정이 파이프를 포함하지 않는 경우와 비교하여 매우 정교한 기술을 요한다. 냉각수 파이프 및 Cu 합금 그리고 Cu 합금과 SS의 접합은 한번의 고온등방가압법(HIP) 과정으로 이루어졌으며, 그림 2와 같이 준비된 금속들을 접합하였다. 그림 3은 이러한 접합에 사용된 HIP 과정을 도시한 것으로, 접합특성 평가 결과로부터 도출된 최적 접합조건, 1050 °C, 150 MPa 하에서 2시간 동안 유지하는 조건이 적용되었다 [1].

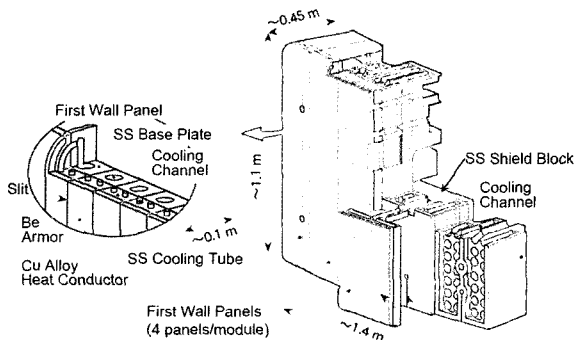


그림 1. ITER 일차벽

* [전자우편] dwlee@kaeri.re.kr

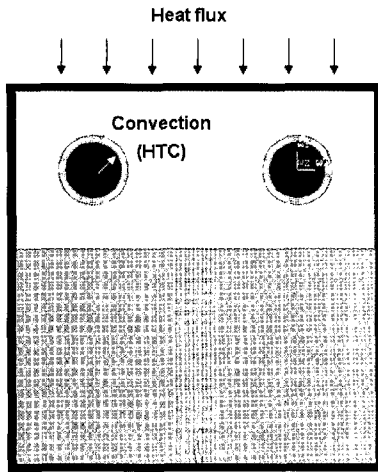


그림 6. FEM 해석 모델

분포는 그림 7과 같으며, Cu 표면에서 531 °C, 냉각관 내, 외부에서 각각 443 °C 및 198 °C였다. 시험에 사용된 Cu/SS mock-up의 경우, 실제 ITER 일차벽과는 달리 SS block 에 냉각관이 없기 때문

에 이에 따른 온도 상승을 확인하였다. SS block의 온도 상승은 약 300초 이후 정상상태를 유지하는 것으로 나타났으며, 이러한 온도 상승은 mock-up 내부의 온도분포에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 시험 및 해석 조건을 이용한 사전 해석에서 Cu/SS mock-up이 나타내는 strain 분포는 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서와 같이, 가열시 최대 strain은 Cu 표면에서 발생하며 그 값은 약 1.0 %이다. 그러나, 가장 취약한 부분으로 파악되는 SS pipe에서의 최대 strain 값을 살펴보면, 약 0.83 %로 나타났으며, 이에 따른 파단 수명은 약 2300 cycle로 계산된다. 이러한 계산은 ITER material properties handbook, file code : ITER-AA02-2402에서 참고된 strain 및 파단 수명 상관식을 이용하였다 [3].

3.2 고열부하 시험 및 결과

시험에 사용된 JEBIS 장치는 그림 8과 같다. 시

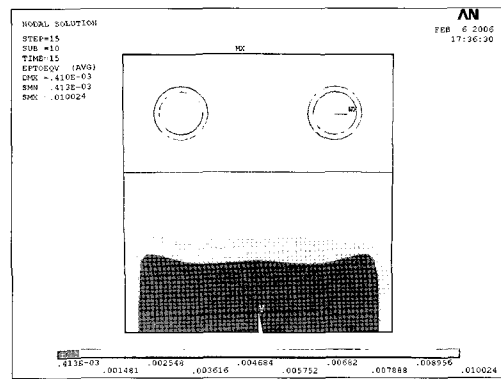
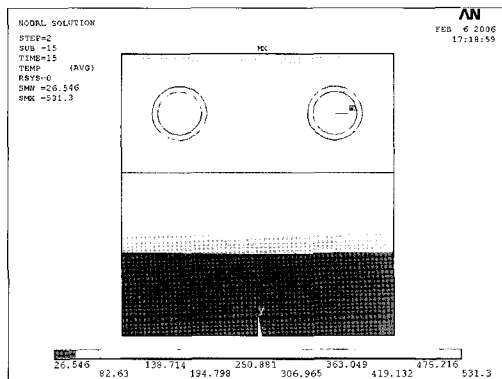


그림 7. ANSYS 해석 결과 : 가열시 (15초) 온도 및 strain 분포

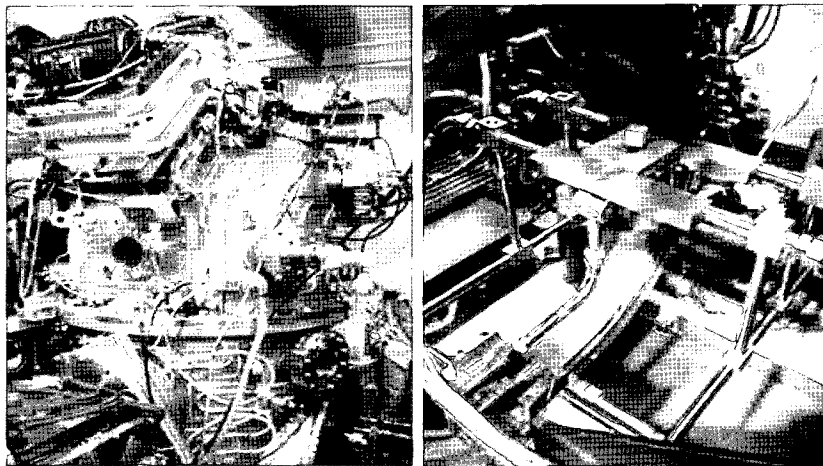


그림 8. JEBIS 장치 및 인출된 Cu/SS mockup

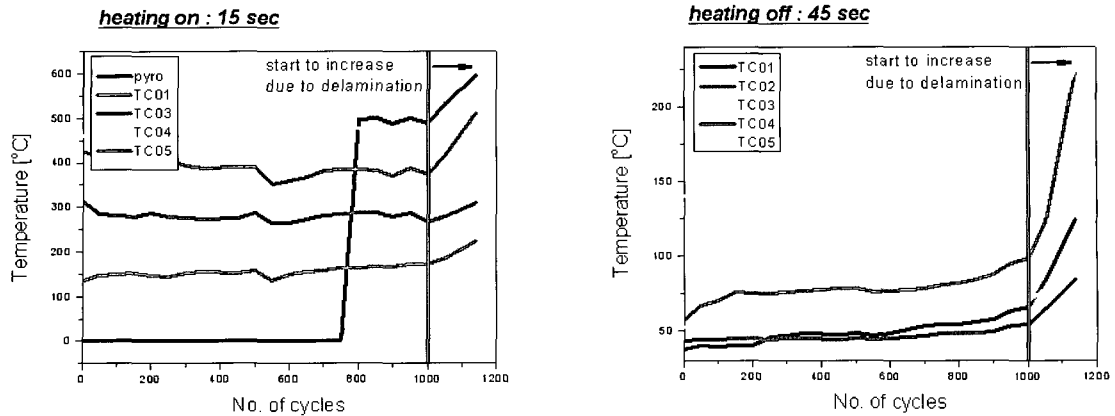


그림 9. 가열 및 냉각시의 주기별 온도 분포

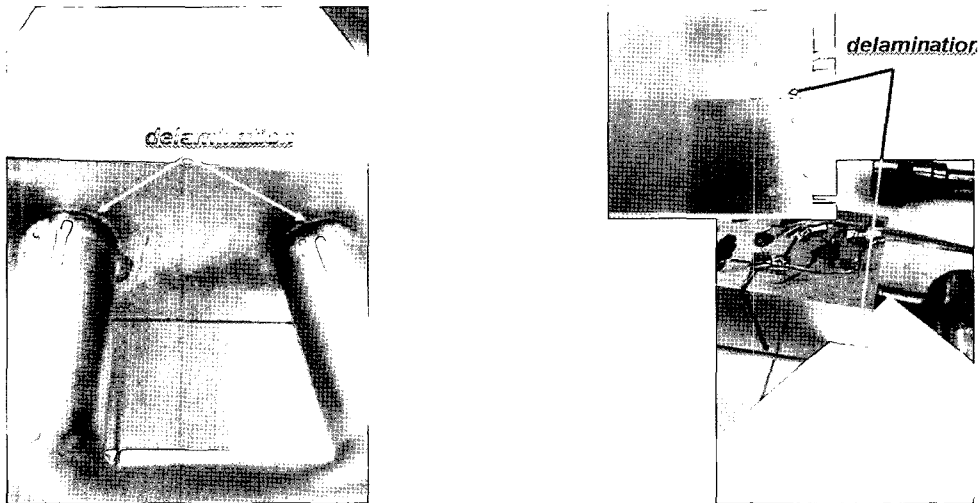


그림 10. 고열부하 시험 후 mock-up의 형상

험에 앞서, Cu block을 이용한 적외선 카메라의 교정과 전자빔의 열부하 측정이 수행되었다. 적외선의 교정 과정에서는 약 30 kV, 0.9 A의 전자빔을 0.5 sec 간격으로 주사하여 IR camera가 측정하는 온도와 Cu block에 설치된 열전대를 통한 온도값을 비교하면서 calibration이 수행되었다. 열부하는 46.7 kV, 1.87 A의 전자빔을 9개의 구멍을 가지는 calorimeter에 50 msec 간격으로 주사하고, 이 calorimeter를 조사 범위에서 이동시키면서 측정하였다. 전체적인 열유속은 Gaussian 분포를 가지며, 평균적으로 5 MW/m²로 유지되도록 조정하였다. Mock-up 및 냉각수관에서 가열에 의해 발생하는 기체는 진공 및 조사되는 전자빔에 영향을 주어, 인가되는 열부하 정도에 영향을 주므로, 이러한 발생 기체들을 배출하는 일련의 준비 작업도 시험 전 수행하였다. 냉각수 manifold를 전자빔으로부터 보호하기 위한 screening block이 설치되었다.

앞서 기술한 바와 같이, 시험은 15초간 약 5 MW/m²의 열부하로 전자빔을 조사한 후, 빔을 끄고 30초간 전자빔의 주사없이 냉각수만을 흘리는 방법으로 진행되었다. 전자빔에 의한 열부하를 받는 Cu의 표면의 온도는 적외선 카메라와 pyrometer를 이용해 측정하여, mock-up의 변형이나 불균일 열부하에 의한 급격한 온도 상승을 모니터링하였으며, 시험 전에 설치된 다섯 개의 열전대를 이용하여 내부 온도 분포를 주시하면서 시험을 진행하였다. 열전대에 의한 온도 측정 자료는 매회 저장하지 않고, 50 cycle에 한번씩 저장하였다.

시험 도중, 약 1000 cycle 이후에서 Cu 표면 및 SS plate에서 급격한 온도 상승이 관찰되었으며, 계속된 온도 상승으로 인해 시험을 중단한 후, 온도 분포 결과들을 확인하였다. 각 주기에 따른 온도 분포를 나타내는 그림 9에서 보는 바와 같이, 1000 cycle 이후, 가열 및 냉각 주기 모두에서 급

격히 온도가 상승하였으며, 이는 mock-up 내부에서 delamination이 발생한 것으로 볼 수 있다. 시험을 종료하고, JEBIS로부터 mock-up을 인출하여 형상의 변화를 육안으로 조사하였으며, 그 결과는 그림 10과 같다. 그림 10에서 보는 바와 같이, delamination은 Cu block과 SS pipe, Cu block과 SS block 사이에서 발생하였다.

측정된 온도 결과와 ANSYS를 이용한 해석결과를 비교하여 그림 11에 나타내었다. Delamination이 발생하기 이전에는 해석결과와 시험결과가 잘 일치하였으며, delamination이 발생한 1000회 이후 급격한 온도 상승을 볼 수 있다.

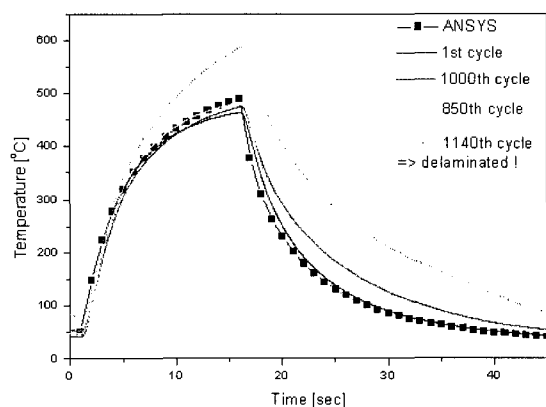


그림 11. 시험 및 해석 결과의 온도 분포 비교

IV. 결 론

ITER 일차벽 조달을 위한 제작 건전성을 평가하기 위해, 일본의 JEBIS 장치를 이용하여 Cu/SS mock-up의 고열부하 시험을 수행하였다. Cu/SS mock-up은 최적화된 HIP 조건을 통해 제작되었고, 시험을 위한 manifold 및 온도 측정 장치가 추가되었다. 시험 조건을 도출하기 위한 예비해석이 수행되었으며, 5 MW/m²의 열부하를 15초 및 30초

로 가열과 냉각을 반복하면서, 약 1000회 정도 전 자빔을 조사하였다. 시험 결과와의 비교를 통해 온도 분포가 잘 일치함을 확인하였다. Strain 값으로부터 얻어진 SS pipe의 설계 수명보다 낮은 조사 횟수에서 delamination이 발생하였음을 확인하였으나, 이종 금속의 접합에 대한 국제적인 기준이 마련되어 있지 않아, 수명 한계 범위를 확인할 수는 없었다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ITER 건설 시 한국은 10%의 FW를 조달하도록 계획되어 있으며, 이에 따라 FW 제작법 개발 및 검증이 단계적으로 이루어질 것이다. 본 연구에서 수행된 Cu/SS mock-up에 이어, Be/Cu mock-up 연구가 진행되고 있으며, 이 실험은 Be 사용이 허가된 미국 Sandia National Lab.의 Electron Beam Test Stand (EBTS)에서 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 주관 국제핵융합실험로 (ITER) 프로젝트 공동개발사업 과제로 수행되었으며, 일본 원자력연구소 (JAEA)의 도움으로 JEBIS 장치를 이용하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Y. Park et. al., "Optimization of joining condition for ITER first wall fabrication" (5th Asia Plasma Fusion Association, Jeju, Korea, Aug. 2005).
- [2] T. Hatano et. al., Fusion Eng. and Des. **39-40**, 363 (1998).
- [3] ITER Material Properties Handbook, File code : ITER-AA02-2402.

High Heat Flux Test of Cu/SS Mock-up for ITER First Wall

D. W. Lee*, Y. D. Bae, B. G. Hong, J. H. Lee, J. Y. Park, and Y. H. Jeong
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600

(Received March 9, 2006)

In order to verify the integrity of the first wall (FW) of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), the fabricated Cu/SS mock-up is tested in the JAEA Electron Beam Irradiation Test Stand (JEBIS). To fabricate the Cu/SS mock-up, CuCrZr and 316L authentic stainless steel (SS316L) are used for Cu alloy and steel, respectively. The hot isostatic pressing (HIP) is used as a manufacturing method with a 1050 °C and 150 MPa. The high heat flux (HHF) test is performed using an electron beam with a heat flux of 5 MW/m² and a cycle of 15-sec on time and 30-sec off time. The temperature measurement in the HHF test shows good agreement with the results obtained from ANSYS code analysis, which is used for determining the HHF test conditions.

Keywords : ITER FW, HIP, Cu/SS mock-up, HHF test

* [E-mail] dwlee@kaeri.re.kr