

ITER 진공용기 설계 현황

허남일, 김병철, 박현기, 장호진, 최인식, 남건우, 조승연, 임기학, 이경수, 정기정
핵융합연구소

Design Status of the ITER Vacuum Vessel

N.I. Her, B.C. Kim, H.K. Park, H.G. Jhang, I.S. Choi, G.W. Nam, S. Cho, K.H. Im,
G.S. Lee and K.J. Jung
National Fusion Research Center

1. 서론

국제핵융합실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)는 최대 열출력 500 MW, 10 이상의 에너지 증폭을 달성을 목표로 한국, 유럽연합, 러시아, 미국, 중국, 인도, 일본 등 7개국이 공동으로 참여하여 건설을 추진 중인 토카막 형태의 핵융합실험로이며, 현재 한국은 TF 도체, 진공용기 본체 및 포트, Blanket First Wall & Shield Block, 열차폐체, 조립장비류의 주장치 분야와 AC/DC Convertors, Tritium Storage and Delivery System, Diagnostics의 부대장치 분야 등 10개 조달품목에 대한 현물조달을 준비 중에 있다. ITER 진공용기는 이 조달품목 가운데 한국이 유럽연합 및 러시아와 공동 조달해야 할 품목이며 한국은 진공용기 본체 20%와 진공용기 포트 76% 조달을 담당하고 있다. 한국은 2005년부터 본격적으로 조달품목에 대한 핵심기술 개발 및 기반구축 사업을 진행해 오고 있으며, 진공용기 분야에서도 ITER 국제팀 및 공동조달국과 함께 상세설계를 직접 수행하고 있다.

그림 1과 2는 현재 건설을 준비 중인 ITER 토카막 주장치를 보여준다. 여기서 진공용기는 플라즈마 진공밀폐를 위해 필수적인 진공 구조물로서 토카막 운전시 초고진공과 열적 구조적 안정성을 요구하고 있다[1]. 현재 진공용기 상세설계는 완료 단계에 있으며, 제작을 위한 기술사양서 작성과 인접 시스템과의 인터페이스 조정에서 유발되는 국부적인 상세설계를 진행 중에 있다.

본 논문에서는 ITER 진공용기 설계와 진행 현황을 소개하고 조달과 관련한 제작준비 현황을 정리하였다.

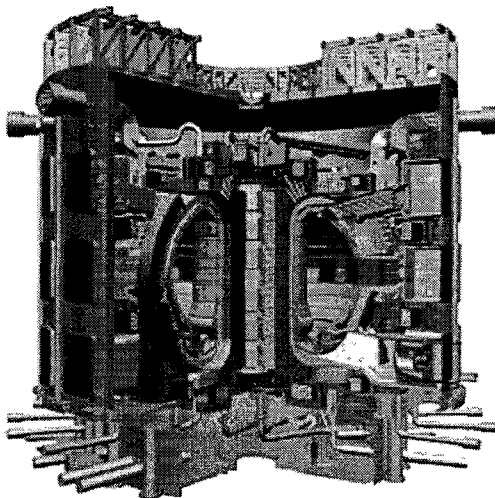


Figure 1. Configuration of the ITER Tokamak Main System

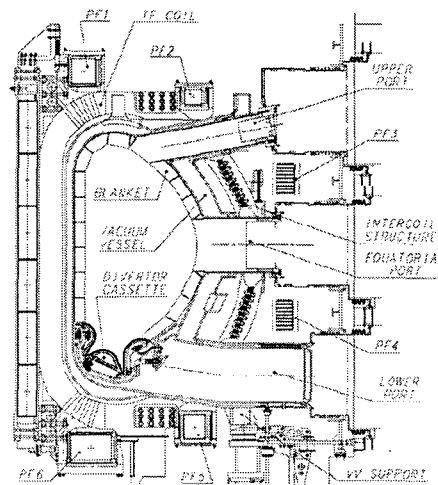


Figure 2. Poloidal Cross-Section

2. ITER 진공용기 설계

2-1. 진공용기 본체

ITER 진공용기 본체는 그림 3과 같은 SS 316L(N)-IG 재료를 사용한 이중벽 구조의 40도 섹터 단위로 제작되며 최종 Site에서 9개의 섹터가 최종 조립되는 구조로 설계되었다. 토카막 운전시 이 격벽 사이에는 100℃의 냉각수를 순환시키고 중성자 차폐를 위하여 SS 304B4와 SS 430 재질의 Shield Block을 설치한다. 진공용기 본체의 전체 외경은 19.5 m에 달하며 높이는 11.3 m 이고, Site에서 최종조립이 완료된 진공용기 전체 무게는 약 5000톤이다. 진공용기 내벽은 Blanket 부착 및 냉각을 위한 구조로 설계되었고, 현재도 이부분에 대한 부분적인 인터페이스 설계변경이 진행 중이다. 진공용기 설계는 초기 ASME 코드에 근거하여 진행되었으며, 현재는 RCC-MR에 근거한 설계검토가 준비 중에 있다.

Table 1 Major Design Parameters of VV

Parameters		Values
Size	Torus OD	19.5 m
	Torus Hight	11.3 m
	Double Wall Thickness	0.34-0.75 m
	Toroidal Extend of Sector	40°
	Number of Sector	9
	Shell Thickness	60 mm
	Rib Thickness	40-60 mm
Surface	Interior Surface Area	850 m ²
	Interior Volume	1600 m ³
Materials	Main Vessel	SS 316L(N)-IG
	In-Wall Shielding	SS 304B4
	Ferromagnetic Insert S.	SS 430
Mass	Main Vessel	1611 ton
	Shield Structure	1733 ton
	Port Structure	1781 ton
	Total	5125 ton
Water Coolant Condition	Normal Operation Temp.	100℃
	N. O. Inlet Pressure	1.1 MPa
	Baking Temp.	200℃
	Baking Inlet Pressure	2.4 MPa
	Design Pressure	3.0 MPa

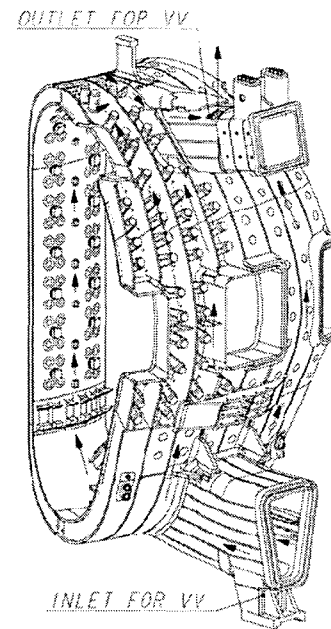


Figure 3. VV Main Vessel

2-2. 진공용기 포트

진공용기 포트는 18개의 Upper Ports, 17개의 Equatorial Ports, 9개의 Lower Ports, Port Penetrations으로 구성된다. 그림 4는 이 포트들이 진공용기 섹터에 부착되는 형상을 나타낸 것이다. Upper Port는 Port Stub, Central Stub Extension, Splice Plate, Port Extension with Connection Duct로 구성되며, Port Stub와 Central Stub Extension 일부는 진공용기 제작사로 납품되어 진공용기 섹터에 조립될 것이다. Equatorial Ports는 13개의 Regular Equatorial Port와 3개의 HNB + H/DNB 포트로 구성된다. Lower Ports는 5개의 Remote Handling용 Port와 4개의 Cryo Pump용 Port로 구성되며, 주변에 IVV Penetration과 4-Pipe 및 2-Pipe Penetration이 부착된다. 진공용기 포트 재질도 진공용기 본체 재질과 같이 SS 316L(N)-IG를 사용하고 있다. 현재 각 포트에 대한 상세설계가 진행되고 있으며, 특히 Lower Port에 진공용기 지지구조물이 부착되는 설계 변경에 따라 진공용기 전체에 대한 구조 안정성 검토 및 상세설계가 요구되고 있다.

2-3. 진공용기 지지구조물

진공용기 지지구조물은 그림 5에서와 같이 수직 및 반경방향 지지구조물로 구성되며, 진공용기 Lower Port에 총 9개가 설치되는 구조를 하고 있다. 이 구조물은 2004년 설계변경이 진행되어 현재도 상세설계가 진행 중이며, 전자기력, 지진하중, Baking 등을 고려한 진공용기 전체에 대한 구조안정성 검토가 요구되고 있다.

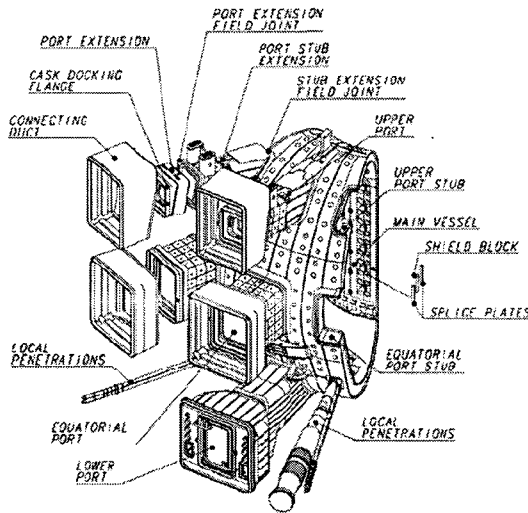


Figure 4. Basic Port Arrangement

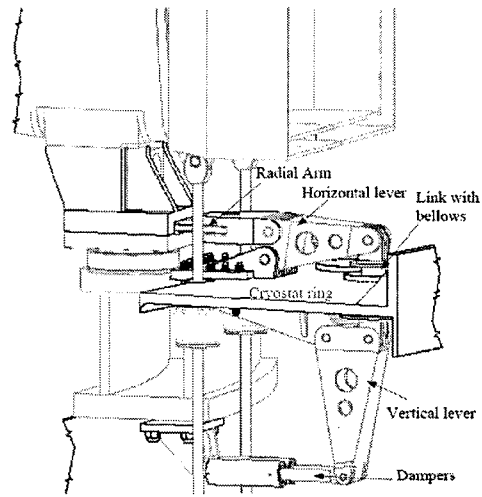


Figure 5. VV Support Structure

3. ITA Task 및 제작준비 현황

3-1. ITA Task 현황

한국은 2005년부터 본격적으로 조달품목에 대하여 ITA (ITER Transitional Agreement) Task를 수행해오고 있다. 진공용기 본체의 경우 ITER 국제팀의 기술사양서 작성 업무에 직접 참여하고 있으며 상세설계 업무도 수행하고 있다. 진공용기 포트에 대해서는 기술사양서 작성, 포트 상세설계, 진공용기 지지구조물 상세설계를 진행하고 있다. Task 결과는 주기적인 다자간 진공용기 회의를 개최하여 기술적인 검토 및 논의를 진행하고 있다. 2006년 말까지 대부분의 진공용기 관련 ITA Task는 종료될 것으로 예상하고 있다.

3-2. 제작준비

(1) 진공용기 제작절차

ITER Site 결정 이전까지 진공용기 설계는 ASME 코드에 근거한 진공용기 설계 및 제작 코드를 적용하였으며, 프랑스 카다라쉬로 Site가 결정된 이후, 유치국의 설계 및 건설 인허가를 받기 위하여 프랑스 원자력 발전소 건설 코드인 RCC-MR에 근거한 ITER 진공용기 코드가 개발 중에 있다. 진공용기 제작은 이 코드에 따라 품질 관리가 적용될 예정이다[2].

진공용기 제작 공정은 Shop에서 섹터 제작공정과 Site에서 섹터 조립공정으로 구분된다. 섹터 제작 공정은 자재검사 및 절단/벤딩, Sub Assembly, Sector Main Assembly, 진공용기 본체와 포트 Stub 조립, Shop Final Test 순으로 진행되며, Site로 운반 후 최종 Torus 조립 용접 및 Site Test가 진행될 것이다. 현재 Shop 및 Site 제작 및 시험에 대한 상세한 공정 개발이 ITER 국제팀과 각 조달국가들의 주도로 진행 되고 있다.

그림 6은 Inboard Part, Upper Part, Equatorial Port Part, Lower Part 등 4개의 부분품이 조립되는 Shop에서 섹터 제작순서를 나타낸 것이다. 현재 고려하고 있는 용접 방법은

후판 구조물의 용접 변형을 최소화하기 위한 협개선 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 용접법이며, 용접부 비파괴검사는 RT(Radiographic Test) 와 UT(Ultrasonic Test)의 혼용을 고려하고 있다. 진공용기 포트 제작공정도 본체의 경우와 유사하며, 일부 부분품 및 조립 완제품으로 제작하여 Site로 운반하는 것을 고려하고 있다.

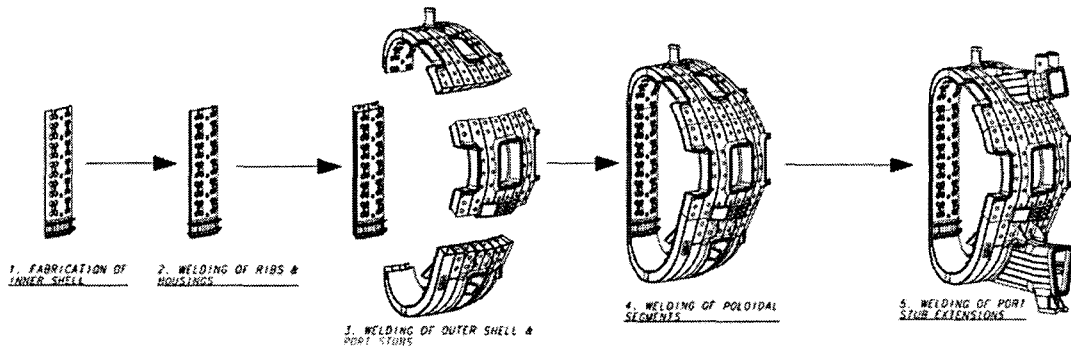


Figure 6. Fabrication Process of the VV Sector

(2) 검사 및 시험

진공용기 본체에 대한 검사 및 시험은 섹터 단위 검사를 위한 Shop Test와 섹터 전체 조립 이후에 수행되는 Site Test로 구분된다. 현재 개발되고 있는 Shop Test 종류 및 방법은 다음과 같으며, 2006년 말까지 모든 시험규격 및 방법이 확정될 예정이다.

- 자재검사 : 제작 코드 및 Mill Sheet에 근거한 화학조성, 재료물성 확인
- 비파괴 검사 : 모든 용접부에 대한 비파괴검사 수행
- 치수검사 : 상온에서 치수 공차 만족
- 냉각채널 압력시험 (상온) : 상온에서 3.85 MPa 압력으로 30분 동안 시험
- 냉각 채널 진공시험 (상온) : 허용 Leak Rate ($< 1 \times 10^{-9} \text{Pa m}^3/\text{s}$)
- 냉각채널 압력시험 (200℃) : 200℃에서 3.85 MPa 압력으로 30분 동안 시험
- 냉각채널 진공시험 (200℃) : 허용 Leak Rate ($< 1 \times 10^{-9} \text{Pa m}^3/\text{s}$)
- 냉각채널 유량시험 (상온) : 냉각 채널의 압력강하 측정
- Baking 시험 : 200℃로 Baking 시 섹터의 온도 및 변형량 측정
- Outgassing 시험 : 진공용기 Inner Shell의 시편에 대한 Outgassing Rate 측정 및 기준치 ($6 \times 10^{-8} \text{Pa m}^3/\text{s/m}^2$ 이하) 만족 확인
- 전기절연 시험 : 진공용기에 부착되는 Thermocouple 과 Strain Gage의 절연저항 측정

4. 결론

본 논문에서는 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업의 일환으로 수행되고 있는 ITER 진공용기 개발에 대한 전반적인 설계진행 현황을 정리하였고 ITA Task 및 제작준비 상황을 요약하였다. 2006년 10월 공동이행협정 체결과 2007년 3월 ITER 국제기구 발족을 기점으로 진공용기 공동조달국간 세부조달할당 합의가 완료될 것으로 예상되며, 2007년 8월경에 제작 계약을 체결하고 2013년까지 조달을 완료할 계획이다.

5. 참고문헌

1. ITER IT, Design Description Document, DDD15 Vacuum Vessel, 2004
2. ITER IT, Technical Specification for the Supply of Main Vessel(Draft), 2005