

KSTAR 진공용기의 3 차원 정밀 측정 및 형상 분석

김경민 a, 양형렬 a, 김학근 a, 김상태 a, 허남일 a, 홍권희 a, 김병철 a, 박주식 a, 문병임 b
 a. 한국기초과학지원연구원, 대전시 유성구 어은동 52 번지, kyungmin@kbsi.re.kr
 b. SA Engineering Co., Ltd., 포항시 남구 효자동 산 31 번지

1 서 론

도우넛 형태의 KSTAR 진공용기는 크게 세 부분으로(Sector I, II, III) 나뉜 상태로 제작사에서 제작되어 KSTAR 주장치가 조립되는 site 로 이동된 후, 각 부분을 최종 용접하여 제작 완료된다[1][2]. 현재 주장치 조립 site 에서는 진공용기 Sector I (180°), Sector II (157.5°) 부분이 서로 용접 완료되어 전체 형상을 3 차원 정밀 측정하였다. 이 3 차원 측정 자료는 진공용기의 최종 형상을 나타내는 것으로 이 후 조립되는 열차폐체와 자석 구조물, port, 등 여러 장치들을 설치 조립하는 기본 자료로 사용될 예정이다. 그러므로, 측정 및 형상 분석 작업은 매우 중요하며 분석을 통해서 다른 장치와의 관계를 정확하게 예측해야만 차후 조립 작업에 차질이 없을 것이다.

2. 3 차원 정밀 측정

3 차원 측정에는 스위스 Leica 사가 개발한 비접촉식 Laser tracker system 을 사용하였다. 이 시스템의 정확도는 10 ppm 이다. 즉, 측정 거리가 10 m 이면 약 0.1 mm 의 정확도를 구현할 수 있다. 하지만, 현장의 작업 상황이나 온도 변화, 진동 등에 의해 예상되는 실제 정확도는 약 0.2 mm 정도일 것이다[3].

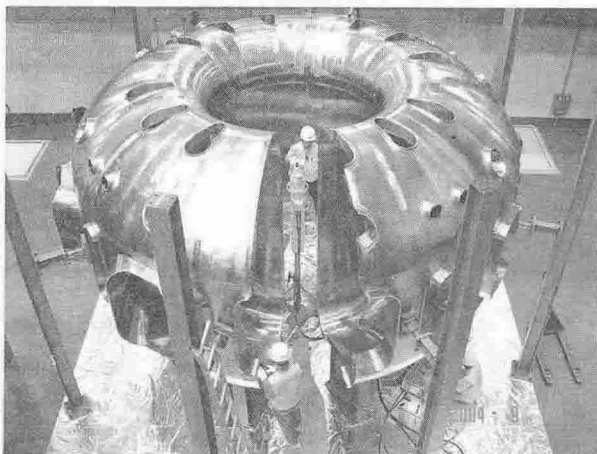


Figure 1. KSTAR 진공용기 3 차원 형상 측정.

진공용기의 측정 항목은 inboard/outboard 의 cylindrical 부분의 반경, lower/upper 부분의

반경, 각종 port stub 의 반경 및 길이, 22.5° opening(Sector III) 부분의 반경 및 형상 등을 측정하였다. 또한, Sector I, II 가 용접 되기 전과 후를 각각 측정하여 비교/분석하였다.

측정 결과의 계산은 설계 도면에 표시된 각 부분의 중심으로부터 반경 및 길이와의 편차를 계산하였다. 좌표계는 오른손 직교 좌표계를 사용하였으며, 진공용기의 중심점 설정은 반경의 중심인 경우 inboard cylindrical 부분의 측정점들을 원형 최적화하여 정하였고, 방위각 중심은 top/bottom vertical port stub 의 토로이달 방향 편차를 계산하여 편차의 평균이 0 이 되는 부분을 원점으로 결정하였다. 높이의 기준은 inner vessel 의 R542 부분을 45°씩 8 지점 상하를 측정하여 최정점과 최저점을 찾은 후 높이의 평균이 0 이 되는 지점을 기준으로 하였다[3].

3. 측정 결과 분석

3.1 본체 형상

진공용기의 수직 단면 형상은 알파벳 'D'와 흡사하다. D 단면의 중심에서 볼 때, 섹터 I, II 용접 전 upper 부분의 반경이 평균 2.19 mm 수축하였고, lower 부분의 반경은 평균 2.16 mm, inboard 부분은 반경이 평균 1.85 mm 수축된 상태였다. Outboard 부분의 반경은 0.22 mm 증가하였으나, 대체로 단면 중심 방향으로 수축하였음을 알 수 있었다. 용접 후의 반경 편차도 크게 변화 없이, upper 부분의 반경이 2.23 mm, lower 부분의 반경 2.14 mm, inboard 부분은 2.42 mm 수축된 상태를 나타냈고, outboard 부분은 0.61 mm 증가된 치수였으나, 전체적으로 단면 중심 방향으로 수축된 것을 나타내었다. 이는 여러 조각으로 나뉜 모재를 용접에 의해서 본체를 제작하였기 때문에 용접심 라인(seam line)을 중심으로 수축되었다고 판단할 수 있다. 진공용기 단면의 형상은 섹터 I, II의 용접에 변화를 받지 않는 것을 알 수 있었고, 측정 결과의 차이는 측정 오차를 비롯해 측정점이 정확히 일치하지 않기 때문일 것으로 판단된다.

3.2 Port stub 형상

진공용기에는 7 종류 총 72 개의 port stub 가 있는데, 이들의 형상 정보는 port 를 조립하는 기본 정보로 사용된다.

가장 큰 형상을 가진 NBI 형 port stub 중 J-port stub 의 방위각(orientation)이 진공용기 섹터 I, II 를 용접하기 전과 후에 중심 이동 변형이 발생했다. 이는 용접 작업 과정에서 22.5° opening 부분이 확장되었기 때문에 port stub 의 중심이 이동되었다고 판단되고, 차후 저온용기와 port 를 조립할 때는 port 의 bellows 를 이용하면 중심 이동 변형이 있는 port stub 도 모두 조립에 문제가 없다고 판단된다. 그 외의 형상은 용접 전후 크게 변화가 없으며 제작 공차내의 제작이 이루어 졌다.

진공용기의 상하부에 있는 top/bottom vertical(TV/BV) port stub 는 곡면 형상과 중심의 방위각은 잘 제작되었으나, stub 의 중심으로부터의 길이는 TV port stub 가 평균 5.54 mm 짧고, BV port stub 는 평균 7.20 mm 짧았다. 이는 stub 자체의 길이가 짧은 것이 아니라 앞에서 언급한 것처럼 진공용기가 용접 라인을 중심으로 단면 형상이 수축했기 때문이다. 하지만, TV/BV port 의 길이가 평균 5 mm 이상 길게 제작되어 있기 때문에 차후 port 조립에 크게 문제가 없다고 판단된다.

단면이 원형인 Slanted port(SP) stub 의 원형 형상은 제작 공차 내에 제작되었으나, stub 의 길이가 upper SP stub 인 경우 크게 벗어난 D, L, J-port 에서 평균 9.57 mm 짧은 것으로 측정되었고, lower SP 인 경우 L, J, P-port 에서 크게 변형이 왔으며 평균 7.79 mm 길이가 짧아졌다. 또한, upper SP stub 의 중심이 진공용기 중심 방향(아래 방향)으로 평균 7.41 mm 이동되었고, lower SP stub 는 윗 방향으로 평균 4.99 mm 중심 이동되었다. 진공용기 섹터 I, II 의 용접 전·후의 변화량은 0.4 mm 이내이므로 섹터 용접에는 영향을 받지 않았다. 하지만, 진공용기가 각 부분 용접에 의해서 'D'형상이 수축하였기 때문에 stub 의 길이가 줄어 들었으며, stub 중심 또한 진공용기 중심으로 이동된 것이다.

3.3 22.5° opening 형상

섹터 III가 차후 용접 되는 22.5° opening 부분은 섹터 I, II 용접에 가장 큰 영향을 받는 부분이다. 섹터 I, II 를 용접하기 전 수축되는 것을 예상해 약 14 mm 를 opening 끝단 부위에서(outboard cylindrical 부분) 확장한 다음 용접을 시행하여 용접 전보다 평균 8.08 mm 커진 상태로 최종 용접 되었다. Inboard

opening 부분에서는 용접 전보다 평균 4.62 mm 변화되었다. 이 결과들은 섹터 III 설계시 반영되어 제작되어야 할 것이다.

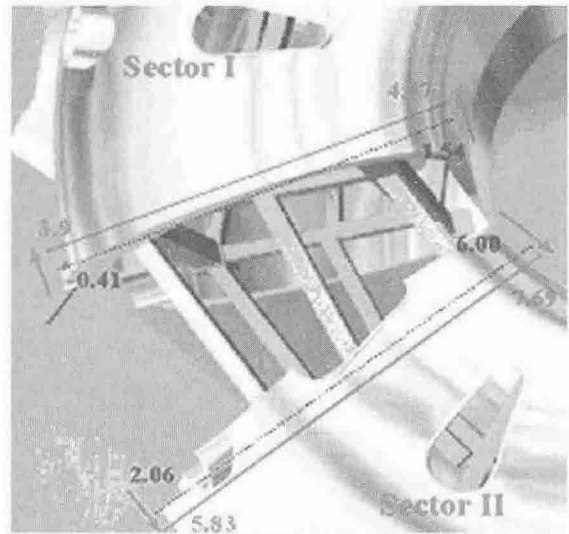


Figure 2. 22.5° opening에서의 용접 전/후 변화 (청색 점선: 용접 전 도면의 정치수와 편차, 적색 실선: 용접 후 도면의 정치수와 편차, unit: mm)

4. 결 론

현재 진공용기의 세 부분 중 섹터 I, II 가 서로 용접 완료된 상태이다. 섹터 용접 전후 본체 형상과 port stub 형상에는 크게 변화가 없었지만, 22.5° opening 부분에서는 용접 변형이 영향을 끼쳤다. 또한, 진공용기의 단면 형상이 제작 과정의 용접에 의해 수축되었다. 이는 기능상 및 구조상 크게 문제는 없지만, 이로 인해 port stub 의 중심으로부터 길이가 짧아지고, stub 의 중심 이동 변형을 발생시켰다. 하지만, port 자체가 길게 제작되어 있고, port 의 bellows 를 사용하면 전체적으로 port 조립에 크게 문제 되지 않을 것으로 판단된다. 도면 치수 보다 확장된 22.5° opening 부분은 치수를 정확히 파악하여 차후 섹터 III 설계 및 제작에 차질이 없어야 할 것이다.

참 고

- [1] J.S.Bak, C.H.Choi, Y.K.Oh, Y.S.Kim, N.I.Her, et al, "Progress of the KSTAR Tokamak Engineering", 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering(SOFE-19), Atlantic City.
- [2] "KSTAR 토카막 주장치 조립 사양서, 조립 절차서", KBSI, SFA, Dec 2003.
- [3] "KSTAR 저온-진공용기 제작 검수용 측정 및 측정망 설치 관리 결과 보고서", KBSI, SA Eng., Aug 2004.