

Development of the Welded Bellows for KSTAR Tokamak

허남일, 김병철, 김근홍, 홍권희, 사정우, 김학근, 김경민, 박주식
 한국기초과학지원연구원, 대전시 유성구 어은동 52 번지
 hni@kbsi.re.kr

1. 서론

현재 개발중인 KSTAR 토카막은 4.5 K 의 저온에 서 운전되는 초전도자석을 이용하여 플라즈마를 밀폐시키는 차세대 핵융합 실험장치로서, Figure 1 과 같이 플라즈마가 밀폐되는 진공용기에는 부대장치와의 인터페이스를 위한 여러 종류의 대형 포트들이 부착되며, 이 포트들은 초전도자석의 단열 유지를 위한 저온용기 벽을 관통하게 된다[1,2]. 진공용기는 1×10^{-8} Torr 의 기저압력 (Base Pressure) 달성을 위하여 최대 130 °C로 베이킹 (Baking)을 실시하며, 토카막 운전 중 진공압력을 포함한 플라즈마 이상거동 (Plasma Disruption)에 의한 전자기력이 작용하게 된다[3]. 이 때문에 진공 용기 및 포트에는 변형이 발생되며, 상온상태로 유지되는 저온용기의 진공용기 포트 관통부에는 Bellow 와 같은 유연한 연결부품이 필요하게 되었다. 진공용기 포트에 연결되는 Bellows 는 협소한 공간 에서 포트 내부의 공간활용을 극대화하고 설치 및 유지보수가 가능하도록 원형, 사각형, 레이스 트랙 (Race Track) 형상으로 설계되었으며, 성형 Bellows 보다 신축성이 양호한 용접 Bellows 를 적용하였 다[4,5].

본 논문에서는 KSTAR 토카막 진공용기용 대형 용접 Bellows 의 설계 및 제작결과를 정리하였다.

2. 용접 Bellows 설계

진공용기에는 NBI, RF, EH 의 수평방향 포트와 기울어진 SP 포트, 상부의 TV 포트, 하부의 BV 포트, 저온용기 외부의 BC 포트 등 총 72 개의 포트가 부착되며, 이 포트의 저온용기 관통부에 Bellows 가 부착된다. Bellows 설계에서는 요구되는 변위와 반복횟수에 따른 피로수명 평가를 통하여 구조안정성을 입증하였다. 수명평가를 위하여 먼저 진공용기의 베이킹, 플라즈마 이상거동, 베이킹 동안 지진이 발생할 경우, 포트의 Bellows 연결부에서 축방향 변위와 횡방향 변위를 구하였다. 실제 베이킹 온도는 130 °C이나 보수적인 설계를 위하여 진공 압력하에서 150 °C 일 경우 변위를 고려하였고, 4 가지로 구분되는 플라즈마 이상거동에 의한 변위도 최대 변위가 발생할 경우로 단일화하여 적용하였다. 지진하중에 의한 변위는 지진을 고려한 등가정적해석 결

과로부터 계산된 값을 사용하였다. 그리고 각 하중조건에 대해 Bellows 의 제작과 조립 시 발생할 수 있는 변위 오차 ± 3 mm 를 반영하였다.

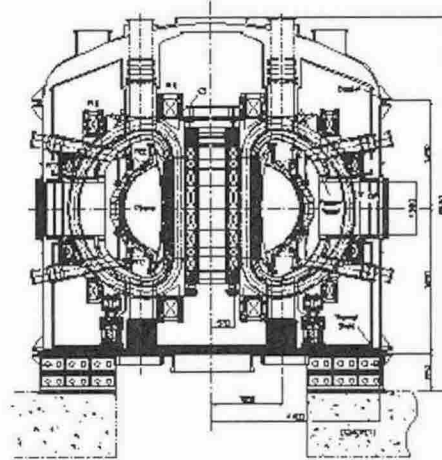


Figure 1. Cross-section view of the KSTAR tokamak

각각에 대한 변위의 반복횟수는 먼저 10 년의 장치수명을 기준으로 산정한 다음, 보수적인 설계를 위하여 반복횟수에 대한 안전계수 3 을 적용하였다. 베이킹 반복횟수는 1 년에 최대 25 회 실시를 고려하였고, 플라즈마 이상거동의 경우는 총 50,000 번의 플라즈마 발생횟수 중 15%의 Eddy Current Disruption 과 5%의 Halo Current Disruption 발생비율을 고려하였다. 베이킹 동안 지진이 발생할 경우의 반복횟수는 10 년 동안 진도 5 규모의 지진(수평 지진가속도=0.12 g, 수직 지진가속도=0.08 g)이 10 초 동안 1 회 발생하고, 진공용기의 고유진동수가 25 Hz 인 것을 고려하였다.

본 연구에서는 Bellows 설계시 일반적으로 사용하고 있는 Minor's Rule 에 근거한 피로수명 평가를 실시하였고, 수명평가결과 모든 Bellows 들에 대한 누적손상계수(Cumulative Usage Factor) 값이 1 이하임이 확인되었다.

3. 용접 Bellows 제작

2004 년 1 월말 7 종 72 개 용접 Bellows 에 대한 제작이 완료되었다. 제작은 재료준비, 절단 및 성형, 세정, 용접, 검사 및 시험, 포장, 운반 등의 각 제작공정에 따라 진행되었다.

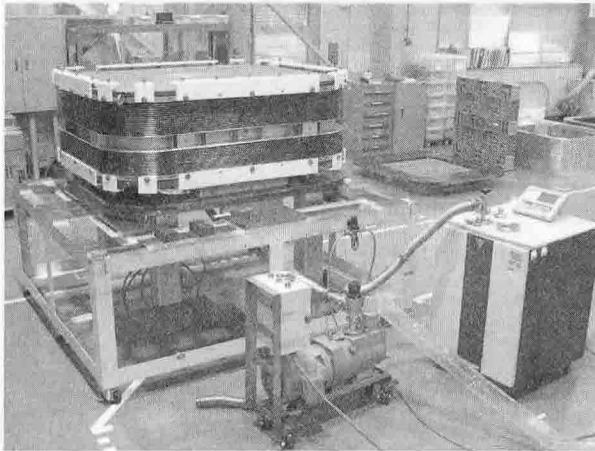


Figure 2. Helium leak test for NBI bellows prototype



Figure 3. Assembled bellows and ports

Bellows의 제작재료는 JIS 규격에 근거한 STS 316L 이고, 플랜지 제작재료는 STS 304 이다. 먼저 각각의 치수에 따라 소재를 절단한 다음, S 형 Bellows 로 성형하여 Diaphragm 을 제작하였다. 그리고 메틸렌 클로라이드(Methylene Chloride) 액 속에 넣어 초음파 세정을 실시한 다음 용접을 실시하였다. Bellows 용접 이전에 시험품을 먼저 제작하여 용접비드를 검사하였고, 검사에 합격한 시험품의 용접사양을 본제품 용접에 적용하였다. Bellows 용접은 충분한 탈지세정과 건조 후 실시하였고 용접부에는 유해한 상흔, 부착물, 산화물이 없도록 관리하였다. 크기가 비교적 작고 형상이 단순한 원형 Bellows 는 GTAW 자동용접을 적용하였고, NBI, RF, EH 포트용 Bellows 와 같은 대형 제품에 대해서는 레이저 용접방법을 적용 하였다.

제작이 완료된 Bellows 본제품은 치수검사를 포 함한 외관검사와 헬륨누설검사에 대한 전수검사를 실시하였고, NBI 용 Bellows 시작품에 대해서는 치수 및 외관검사, 스프링 상수 측정, 탈가스방출량 측정, 내압시험, 헬륨누설시험, 피로수명시험과 같은 형식시험을 실시하였다. 시작품의 탈기체 방출량 측정은 200 °C에서 48 시간 베이킹을 실시한 다음

수행하였으며, 방출량이 1×10^{-11} Torr l/sec cm^2 이하임을 확인하였다. 그리고 Figure 2 와 같이 헬륨가스 외복법에 의한 헬륨누설시험을 실시하여 누설량이 1×10^{-9} Torr l/sec 이하임을 확인하였다. 스프링 상수 측정은 Bellows 의 축방향에 대해서만 실시하였으며, 설계시의 계산결과와 유사함을 확인 하였다. 내압시험에서는 Bellows 의 양단에 블랭크 플랜지를 부착하고, 질소가스를 0.15 MPa 이 되도록 봉입한 다음 압력계의 눈금 저하 및 제품의 변형 유무를 검사하였으며, 모든 시험에서 기준을 만족 하였다. Figure 3 은 용접제작이 완료된 Bellows 와 조립이 완료된 진공용기를 나타낸 것이다. 현재 모든 제품이 KBSI 에 입고되어 조립 대기중이다.

4. 결 론

KSTAR 핵융합실험장치에 사용되는 대형 용접 Bellows 의 개발이 2004 년 1 월 완료되었다. Bellows 가 설치되는 진공용기 포트의 하중조건 에 따른 변위와 진공압력조건을 고려하여 피로강 도 평가가 수행되었고, 계산결과 피로파손이 발생하지 않을 것으로 예측되었다. 제작이 가장 어려울 것으로 판단되는 대형 NBI 포트용 Bellows 에 대해서는 본제품 제작 이전에 시작품을 제작 하여 형식시험을 완료하였으며, 시작품을 통하여 검증된 제작기술은 본제품 제작에 적용되었고, 본제품의 전수시험 결과 품질기준을 모두 만족 하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 기초과학연구사업(KSTAR Project)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] G. S. Lee, "The Design of the KSTAR Tokamak", Fusion Engineering and Design, Vol. 46, p. 405-411, 1999.
- [2] J. S. Bak, C. H. Choi, Y. K. Oh, Y. S. Kim, N. I. Her, K. H. Im, H. L. Yang, B. C. Kim, I. K. Yu, J. W. Sa, K. K. Kim, M. Kwon, G. S. Lee, and the KSTAR Team, "Progress of the KSTAR Tokamak Engineering", 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE-19), Atlantic City, 2002.
- [3] S. Cho, "Design Analysis of Electro-magnetic Forces on the KSTAR Vacuum Vessel Interfaces", Fusion Engineering and Design. Vol. 51, p. 219-227, 2000.
- [4] N. I. Her, S. Cho, J. W. Sa, K. H. Im, and G. H. Hong, "Structural Design and Analysis for the KSTAR Cryostat", 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE-19), Atlantic City, 2002.
- [5] N. I. Her, G. H. Kim, H. K. Kim, J. W. Sa, B. C. Kim, G. H. Hong, K. M. Kim, H. T. Kim, K. H. Im, C. H. Choi, and J. S. Bak, "Design of the Welded Bellows for KSTAR Tokamak", Proceedings of the KAMES 2002 Joint Symposium A, p. 445-449, 2002.