

## KSTAR 초전도자석 제작을 위한 진공 열처리

우인식\*, 김동진, 박원우, 이동근, 주재준, 박현택, 임병수, 박갑래, 박주식

핵융합연구센터(NFRC)

\* E-mail : iswoo@nfrc.re.kr

KSTAR 초전도자석은 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선재와 Incoloy908 재질의 Jacket으로 구성된 CICC(Cable in Conduit Conductor)를 초전도도체로 사용하여 만들어진다. 그런데 초전도자석이 극저온에서 초전도성질을 가지기 위해서는 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도도체의 반응 열처리가 요구된다. 이를 위해 초전도자석은 초전도 도체를 코일 형태로 권선한 후 진공 열처리로 내부에서 대략 30일간의 열처리를 수행하는데, 이 과정은 초전도도체의 불순물 제거를 위한 460 °C 구간 열처리, 내부 주석(Sn) 확산을 위한 570 °C 구간 열처리, Nb와 Sn이 Nb<sub>3</sub>Sn 화합물을 형성하는 660 °C 구간 열처리로 이루어진다. 이 과정에서, Jacket에 발생할 수 있는 SAGBO(Stress Acceleration caused by Grain Boundary Oxidation)현상이라는 고온 산화를 방지하기 위해 열처리로의 내부 진공도를 산소분압 기준으로 660°C 고온상태에서 0.08 ppm이하를 유지하여야 한다.

이를 위해 KSTAR에서는 초전도 자석이 들어 갈 수 있는 대형 진공 열처리로를 만들어 열처리를 수행하였다. 대형 진공열처리로는 자석 크기와 공정 단축을 위해 1호기와 2호기로 2개를 제작하였다. 1호기, 2호기 모두 원통모양의 형상이며, 1호기에 비해 규모가 큰 2호기의 경우 최대 외경 6.4m, 높이 약 5.2m이고 진공가열용기의 크기는 5m x 1.8m로 국내 최대 규모의 진공 열처리로라 할 수 있다. 또한 1호기와 2호기 모두 진공도는 5x10<sup>-7</sup> Torr을 대기압에서 24시간 이내 달성할 수 있도록 함과 동시에 Heater 가동 후 1x10<sup>-6</sup> Torr의 진공도를 1시간 이내에 달성할 수 있도록 제작하였다. 진공용기의 내부 온도는 최고 900 °C이고, 공간온도 분포균일도는 ± 3°C이며, 시간 온도 변화 안정도는 45일 연속 ± 3°C로 자동 온도 제어 장치를 통해 제어된다.

열처리과정 중, 요구되는 진공 분위기를 만들기 위해 대기압에서 1X10<sup>3</sup> torr까지는 피스톤 펌프 2대와 루트 펌프 1대로 구성된 Roughing 펌프시스템을 이용하여 저진공 분위기를 만든 후, 4대의 Cryopump로 구성된 Cryopump 시스템을 이용하여 1X10<sup>3</sup> torr 이하의 고진공 분위기를 형성하였다. 또한 열처리 도중 진공도가 떨어지게 되면 Dry pump를 이용하여 4개의 Cryo-Pump를 1개씩 교대로 Regeneration한 후 재가동하여 열처리과정 중 고진공을 유지할 수 있도록 하였다. 열처리 과정 중 온도제어는 챔버 내부에 설치되어 있는 열선의 온도를 PID제어를 통해 독립적으로 제어하였다. 열처리과정 중 온도 상승속도는 6 °C/hr이며, KSTAR 열처리 시나리오인 460 °C에서 100 시간, 570 °C에서 200 시간, 660 °C에서 240 시간을 유지하도록 시나리오를 입력하여 열처리를 수행하였다. 그리고 CICC 내부의 SAGBO 현상을 방지하기 위해 CICC 내부에 초고순도(99.9995%) Ar gas를 연속적으로 CICC 내로 흘려주어 출구에서의 Ar gas에 포함된 산소 및 수분의 농도가 0.08 및 0.4ppm 이하로 유지되도록 하였다. 한편 진공열처리 과정에서 진공도, 온도제어, 가스 Purge 등이 상호 유기적으로 연결되어 질 수 있도록 PLC(Programmable Logic Controller)를 기본 시스템으로 채용하여 제어에 활용하였다. 또한 열처리의 진행상황을 monitoring하기 위하여 열처리 진행시간 및 온도, 진공도, Purge 가스분석 결과 등과 같은 주요 변수 등을 Web에서 Monitoring하는 방법을 개발하여 전체적인 열처리로의 운전상황을 Monitoring하며 열처리를 수행하였다.