

ITER 초전도자석 전원공급장치의 구조설계를 위한 유한요소 해석

정우식, 이승윤, 조성만, 박형진, 정인승, 황광철, 유효열, 오종석*, 최정완*, 서재학*
 (주)다원시스, 국가핵융합연구소*

FEM Analysis of AC/DC Converter for ITER Superconducting Magnet

W. Jung, S. Lee, S. Jo, H. Park, I. Chung, K. Hwang, H. Liu, J. S. Oh*, J. Choi*, J. H. Suh*
 Dawonsys Co., Ltd., National Fusion Research Institute (NFRI)*

Abstract

ITER 초전도자석 전원공급장치는 대전류를 흘리기 위한 자체 지지구조 버스바와 이를 지지하기 위한 구조물로 구성된다. 장치설계에 있어 버스바와 지지구조물은 단락 시 전자기력에 대한 내성, 통전전류에 의한 버스바 발열 등의 요구조건을 만족하여야 한다. 본 논문은 ITER 초전도자석 전원공급장치에 유한요소해석을 적용하여 여러 요구조건에 부합하는 설계의 적합성을 검증한다.

1. 서론

ITER 초전도자석 ac/dc 컨버터의 전기적, 구조적 성능을 고려한 형상설계 및 디자인과 이를 검증하기 위한 다양한 방법 중 유한요소해석을 활용한다. 그림 1에서 단락전류 발생 시 dc interconnecting 버스바의 전자기력에 대한 구조 강건성, 정상 운전시 버스바에 흐르는 전류로 인한 발열 영향, 장비에 외력이 주어지는 상황에서 구조결합을 유지하기 위한 기계요소 조건과 같은 주요 설계부위를 유한요소해석을 통하여 확인한다.

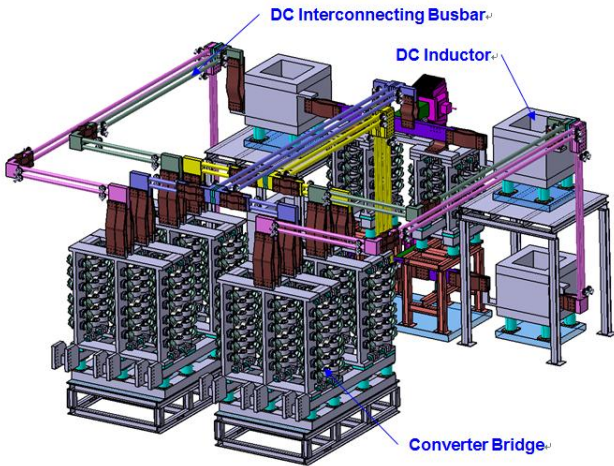


Fig. 1 The shape of CS type converter unit

2. 본론

2.1 단락 시 DC Interconnecting 버스바에 걸리는 전자기력에 대한 구조 강건성

컨버터 브리지와 dc 인덕터 사이를 연결하는 dc interconnecting 버스바는 전류사양에 따라 스위칭 소자의 병렬수가 달라지는데, 전류가 가장 큰 TF type에서 단락 시 전자기력에 대한 구조의 강건성을 보도록 한다. TF dc

interconnecting 버스바는 3개의 파이프가 병렬로 연결되며, 단락전류 350 kA에 대한 전자기력은 식 (1)에 의해서 정해진다.

$$F = \frac{2 \times 10^{-7} \times I_1 \cdot I_2}{d} \quad (1)$$

F(N/m): 단위길이 당 작용하는 전자기력
 I_1 (A): 버스바 No.1 에 흐르는 단락 전류 량
 I_2 (A): 버스바 No.2 에 흐르는 단락 전류 량
 d(m): 두 개의 버스바 사이의 거리

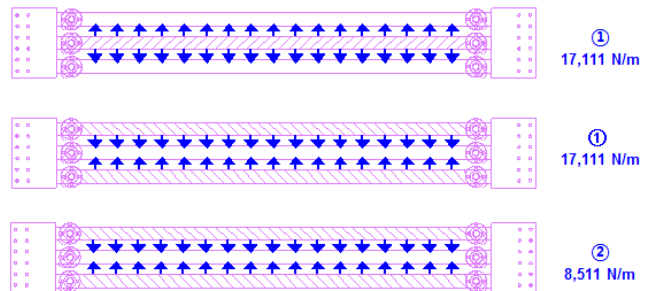


Fig. 2 Electromagnetic force direction between pipes (pulling force)

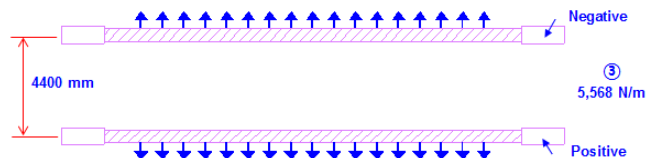


Fig. 3 Electromagnetic force direction between busbars (pushing force)

단락 시 3개 파이프간 전자기력은 서로 당기는 힘이 그림 2와 같이 6.9 m의 버스바 길이에 분포하중으로 작용한다. Positive와 negative 버스바 사이에 발생하는 전자기력은 서로 미는 힘으로 그림 3과 같은 분포하중으로 작용한다.

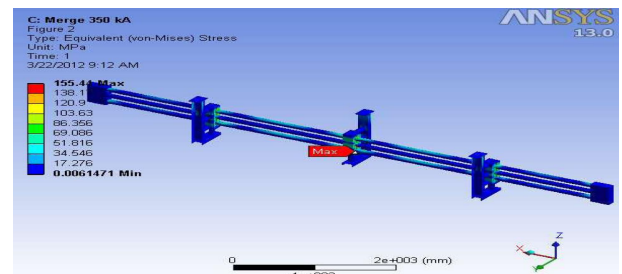


Fig. 4 Analysis result

유한요소해석의 결과 값은 그림 4와 같으며, 단락

전자기력 발생 시 Von-Mises 최대응력은 155 Mpa이다. 버스바 재질(A6101-T6)의 내력은 165 Mpa이므로 재료에 직접적인 소성변형은 주지 않으며, 사고발생 빈도로 볼 때, 구조의 강건성에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

2.2 정상운전 시 DC Interconnecting 버스바에 흐르는 전류로 인한 발열 영향

전류가 흐를 때, 버스바 내부의 전기저항으로 인한 발열이 발생된다. 이러한 발열로 인한 장비 성능과 구조의 안전성을 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행한다.

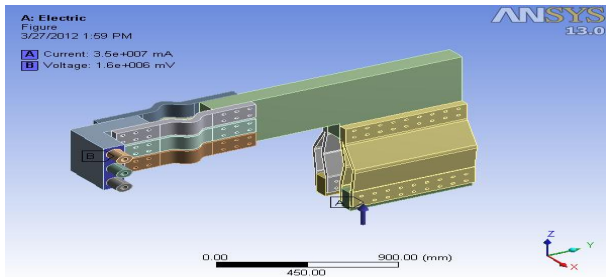


Fig. 5 Boundary condition value

그림 5는 TF type으로 컨버터 브리지 출력과 연결된 dc interconnecting 버스바의 발열을 본 것이고 전류값은 35 kA 기준을 적용한다. 그림 5 좌측에서 Flexible 버스바와 연결된 단자에는 수 배관이 형성되어 있고, 냉각 수 온도와 대기온도는 40°C 기준으로 한다.

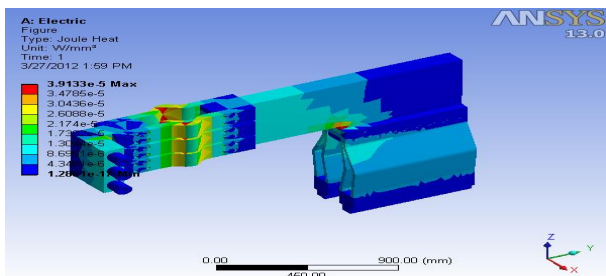


Fig. 6 Joule heat

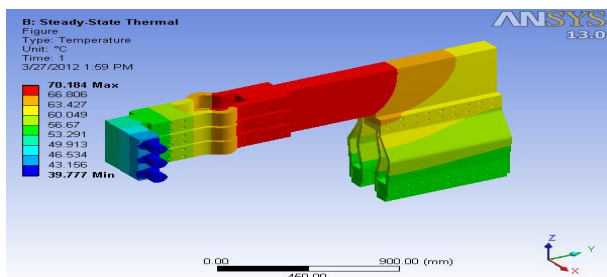


Fig. 7 Heat distribution

그림 6에서 주울 열의 분포를 보면 전류가 몰리는 부분과 flexible 버스바 부근에 집중 발열이 되는 것을 알 수 있으며, 최종 온도평형상태인 그림 7을 보면 ΔT 가 30°C 내외이므로 기준 35°C 이하 조건에 부합되는 것으로 판단된다.

2.3 외부 힘에 의한 장비구조 변형방지를 위한 요소해석

그림 8에 보이는 CS 컨버터 브리지는 ac 버스바와 dc 버스바가 볼트(M30)로 결합되어 있다. 구조물은 지진에

의해 자중을 고려한 수평 하중력 0.2g 조건을 만족해야 한다. "X" 방향 수평하중 시 볼트와 이를 둘러싼 절연 파이프에 전단력이 작용하며, 이에 절연 파이프가 파괴되지 않아야 한다. 결과적으로 ac 버스바와 dc 버스바의 체결에 의한 마찰 강도가 자중을 고려한 수평 하중력보다 크게 하여 절연 파이프에 영향을 주지 않도록 한다.

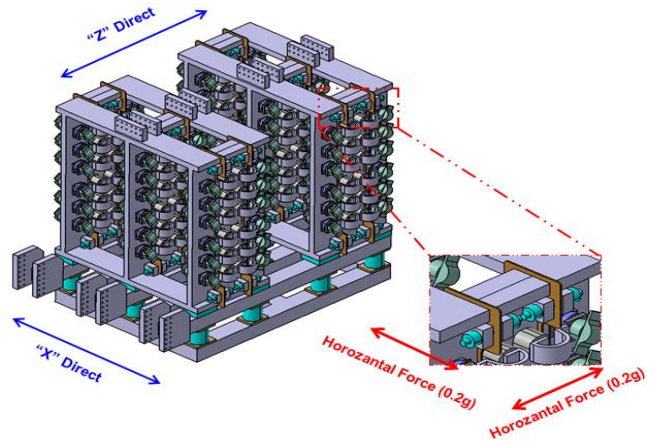


Fig. 8 The horizontal force of CS type converter bridge

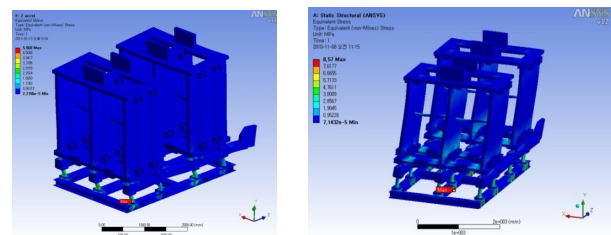


Fig. 9 The result of seismic analysis

유한요소해석 결과 그림 9에서 M30 볼트 체결에 의한 구조에서 재료의 변형을 초래하는 변형이나 응력 발생은 없으며, 절연 파이프의 손상도 없는 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 ITER 초전도자석 전원공급장치의 형상결정에 유한요소해석을 적용하여 가정과 계산 식에 대한 검증을 하였고, 이를 통해 최종 디자인 결정에 접근성을 향상시켰다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부, 지식경제부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2012-0000255)의 연구결과임

Reference

- [1] J. S. Oh, J. Choi, J. Suh, O. Kwon, J. S. Ahn, I. Benfatto, J. Tao, P. Fu, "Status of the Korean R&D Program on the ITER Coil Power Converters," IAEA FEC, Daejeon Korea, Oct. 2010
- [2] J. S. Oh, J. Choi, J. H. Suh, H. Liu, S. Lee, H. Park, W. Jung, S. Jo, H. Tan, J. Tao, P. Fu, "Korean R&D on the 6-Pulse Converter Unit for ITER ACDC Converters", 2011 Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Aug. 2011
- [3] 정우식, "Components Modeling for AC/DC Converter Units", The Way to Fusion Energy, ITER, 2012년 2월