KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 냉각 시스템에 대한 열해석 연구

김홍원† · 하지수* · 김대순* · 이종석** · 최창호***

A Study on Thermo-Hydraulic Analysis for KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) Cooling Line System

H. W. Kim, J. S. Ha, D. S. Kim, J. S. Lee, and C. H. Choi

Key Words : KSTAR, Cooling tube(냉각 튜브), Toroidal Field(도넛형 필드), Cool Down(운전 초기 냉각)

Abstract

A study on the engineering design and numerical thermo-hydraulic analysis for KSTAR TF coil structure cooling system has been conducted. The numerical analyses have been done to verify the engineering design of cooling using the commercial code, FLUENT and in-house code for calculating helium properties which varies with cooling tube's heat transfer. Through the engineering design process based on the steady heat balance concepts, the circular stainless steel tube with inner diameter of 4 mm for TF coil has been selected as cooling tube. From normal operation mode analysis results, total 28 cooling tubes were finally chosen. Also, three dimensional cool down analysis for TF coil with designed cooling tube was satisfied with next three design criteria. First is cooling work termination within a month, second is maximum temperature difference within 50 K in TF coil structure and third is exit helium pressure above 2 bar. Consequently, these cool down scenario results can afford to adopt as operating scenario data when KSTAR facilities operate.

1. 서 론

현대중공업은 한국 기초과학 지원연구원(KBSI)으로부터 KSTAR(한국형 핵융합 설비)의 주요 구성기기인 진공용기(선행품 & 본제품), 초전도 자석구조물(선행품) 및 저온용기(선행품)를 수주하여 1997 년부터 공동설계 및 제작을 성공적으로 수행해 오면서 향후 KSTAR 본제품 뿐만 아니라 국제 핵융합 설비의 수주에 박차를 가하고 있다.

현재까지 수행해 온 연구는 제작과 관련하여 주요 구성품에 대한 용접기술 적용, 변형예측, 3차원 정밀 측정 및 공학설계(강도평가 포함) 등이며 본 연구에서는 공학설계 부분인 초전도 자석 구조물의 냉각시스템을 위한 냉각튜브 설계에 대해 수행했던 열해석 결과를 소개하고자 한다. 열해석은 열 유동 해석 상용 프로그램인 FLUENT 과 별도의 계산 서브루틴을 연계하여 해석하였다.

헬륨냉각 시스템 및 냉각 튜브 설계는 초전도 자석 구조물에서 초전도성을 유지하기 위해서 구조물의 온도를 극저온상태(약 5K)로 만들어 주어야 하는 필수조건으로 이는 핵융합 설비의 성능과 직결되므로 전체 시스템 중에서도 핵심적인 설계 요소이다.

† 현대중공업 기술개발본부
E-mail : khw007@hhi.co.kr
TEL : (052)230-3227 FAX : (052)250-9578
* 현대중공업 기술개발본부
** 현대중공업 플랜트 사업본부
*** 한국 기초과학 지원 연구원(KBSI)

2. KSTAR 냉각 시스템 개요

KSTAR 장치는 자기장을 형성시켜 주는 16 개의 Toroidal Field (이하 TF) 코일과 4 쌍의

Central Solenoid (이하 CS) 코일 그리고 3 쌍의 외부 Poloidal Field (이하 PF) 코일을 포함하는 초전도 자석으로서 정상상태에서 실험이 가능한 핵융합 설비이다. KSTAR 시스템의 전체 개략도는 Fig. 1 에 나와 있으며 모든 코일은 적도면에 대해서 각각 위아래 대칭구조로 정렬되어 있다.

TF 구조물은 기계적, 전기적 그리고 열 부하로부터 감겨진 코일을 보호하기 위하여 초전도 TF 코일을 둘러싸고 있으며 CS 코일과 PF 코일을 구조적으로 지지하고 있다. 운전에 필요한 공급전력 손실을 최소화하기 위하여 코일은 Cable-in-conduit conductor(CICC)내의 초임계 헬륨유동의 강제 대류 냉각에 의해서 초전도 상태를 유지해야 한다. Ramp-up(가동시작), Shot(샷 운전), Plasma disruption(플라즈마 분열)과 같은 다양한 운전모드 중에 eddy 전류에 의해 유도되는 joule heating(주울 가열)으로 인해 구조물 내에 축적된 열에너지가 접촉표면을 통하여 코일로 전달되기 때문에 초전도 자석 구조물에서 열적 안정성 문제는 매우 중요하다.

KSTAR 장치운전은 크게 두 가지의 운전조건으로 대별된다. 첫째, 핵융합 반응을 일으키기 위한 준비 단계로써 KSTAR 장치의 전체온도를 300K 상온에서 4.5K 의 극저온 상태로 낮추는 Cool Down(운전 초기냉각) 과정이다. 둘째, 고온(약 1 억도)의 플라즈마가 발생하는 단계인 Normal Operation(정상운전) 모드로서 Shot, Plasma Disruption 및 Idle(무부하) 모드 등이 있다.

본 연구에서는 KSTAR 구조물 중에서도 중요한 TF 코일 자석구조물에 대해 위 두 가지 운전조건을 만족하는 최적의 냉각 튜브 사양을 설계하고 해석적인 방법을 통하여 설계 안을 검증하였다.

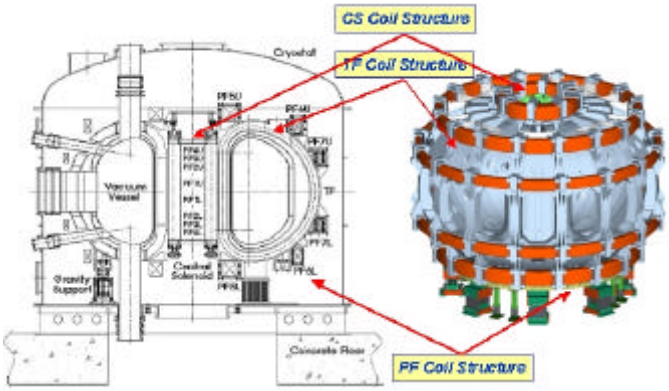

Fig. 1 KSTAR system configuration

2.1 냉각 시스템의 설계기준

Cool Down 인 경우, 공급되는 헬륨의 질량은 128g/s 이며 한 달이내에 TF 구조물 전체의 온도가 4.5K 로 되어야 하며 구조물의 열변형 방지를 위해 Cool Down 되는 동안에 구조물의 최대 온도차가 50K 를 초과해서는 안 되며 출구에서의 헬륨의 압력을 2bar 이상이 되도록 입구압력을 냉각시간과 구조물의 온도에 따라 설정해 주어야 한다. 위 조건을 모두 만족하는 Cool Down 시나리오를 설정하여 설계기준을 만족할 때까지 반복적인 방법을 수행하였다.

2.2 TF 냉각 튜브 사양 설계

냉각튜브 설계는 전체 튜브 길이가 내경(3 or 4mm)에 비해 아주 길므로(11m) 1 차원적인 압축성유동으로 가정하여 설계기준의 압력손실과 출구 허용온도를 만족하는 직경과 튜브 개수를 산정하였다. 본 연구에서는 최초에 설계된 브레이징 패드 타입이 제작상 불가능하다고 판단됨에 따라 직접 용접하는 타입으로 변경이 불가피하게 됨으로써 Table 2 와 같이 내경은 4mm 로 크게 하되 개수를 변경하는 여러 가지 설계안을 놓고 열해석을 수행함으로써 최종 사양을 결정하였다.

Table. 1 Cooling tube specification comparison of TF coil

Type	브레이징 패드	용접		
내경(mm)	2.98	4	4	4
튜브 개수	28	20	28	32

Fig. 2 와 3 은 브레이징 타입과 용접 타입의 비교를 나타낸 것이며 차이점은 브레이징은 냉각튜브 전체가 주위의 구조물과 열전달이 이루어지는 것을 의미하고 용접은 접합된 길이만큼만 주위로 열전달이 이루어지는 것을 말하므로 냉각효과가 브레이징에 비해 떨어질 수밖에 없다. Fig. 4 와 5 는 TF 코일과 냉각튜브의 단면도를 보여주고 있다.

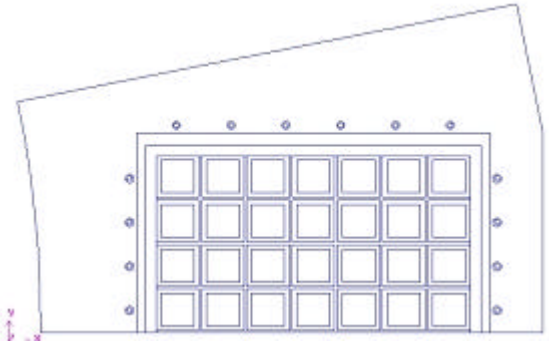

Fig. 2 Cooling tube distribution of TF cross section (brazing type)

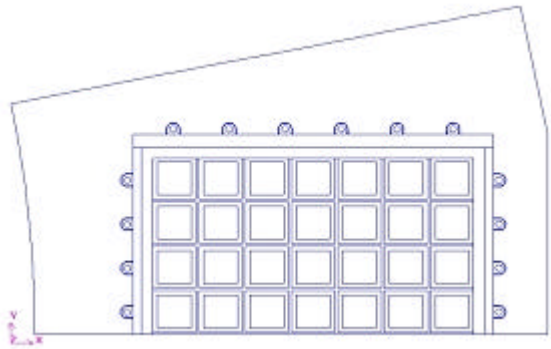

Fig. 3 Cooling tube distribution in TF cross section (welding type)

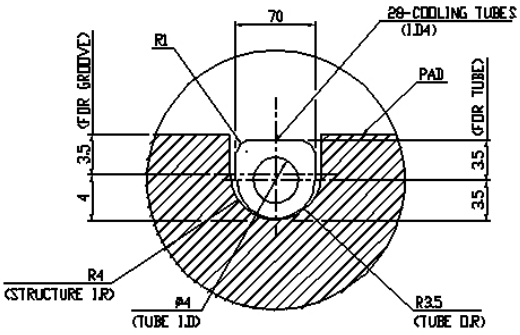

Fig. 4 The detailed cooling tube geometry

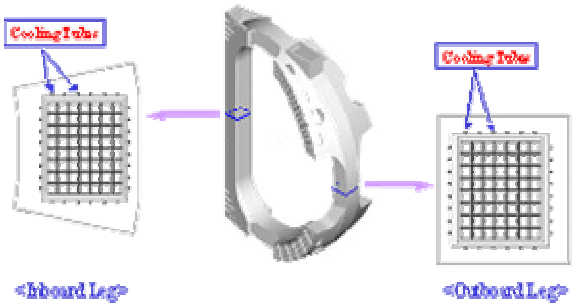

Fig. 5 TF coil with cooling tube

3. TF 냉각 시스템 해석

3.1 TF 냉각 튜브 사양변화에 따른 2차원 해석

2 차원 해석에서는 해석 작업의 단순화를 위해 TF 코일 전체를 모델링하지 않고 가장 열적 부하를 많이 받는 곳인 TF 코일 3 단면에 대해서 중점적으로 해석하였다.(Fig. 6 참조) TF 코일 내부에는 냉각헬륨의 온도가 5K 로 흐르고 있는 것으로 가정하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다. Table 3 에서는 2 차원 열해석 경계조건인 normal operation 모드일 때의 열부하(Heat Load)를 나타내는데 열부하에는 전도, 대류, 복사에 의한 정적인 열부하와 운전모드에 따라 변하는 joule heating, nuclear heating 등과 같은 동적인 열부하를 모두 포함한 값이다. Shot 은 플라즈마를 발생시키기 위해 강한 자기장을 걸어주는 단계이며 Plasma disruption 은 플라즈마가 진공 용기 내벽에서 깨지는 상태를 말하며 TF 코일 주위로 202KW 에 해당하는 열을 0.01sec 동안에 발생시킨다. Idle 모드는 구조물의 냉각기간을 의미하며 이때 동적인 열부하는 없다.

Table 3 Heat load for TF coil operating mode

운전 모드	시간(sec)	열부하
Shot	70	4.3 KW
Plasma disruption	0.01	202 KW
Idle	1200	158 W

Fig. 7 과 8 은 Shot 모드 후, Fig. 9 와 10 은 플라즈마 분열 후, 마지막으로 Fig. 11 과 12 는 무부하 모드 종료시 온도분포를 나타낸다. 여기서 결과는 지면 관계상 브레이징(28ea)과 용접(28ea)한 것에 대해서만 나타내었다.

용접한 경우가 브레이징에 비해 최대온도가 조금씩 더 큰 것으로 나타났으며 플라즈마 분열직후에는 각각 6.08K, 6.13K 로 확연히 달라졌다. 또한 최대온도 뿐만 아니라 전체적인 온도분포를 보면 용접한 경우의 냉각효과가 브레이징한 것보다 더 떨어진다는 것을 알 수 있다. Fig. 13 에서는 각 해석경우에 대해 시간에 따른 온도변화를 비교한 그래프이다. 본 결과를 통해서 냉각튜브 개수는 20 개인 경우는 냉각효과가 매우 나빠서 적용할 수 없고 28 개인 경우와 32 개인 경우는 서로 비슷하므로 제작 여건상 28 개로 선정하였다. 최종적으로 2 차원 열해석을 근거로 하여 3 차원 Cool Down 해석을 수행하였다.

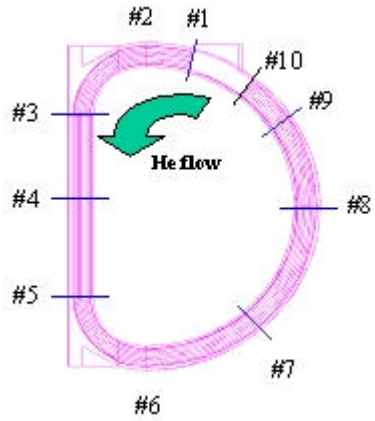

Fig. 6 The side view of TF coil

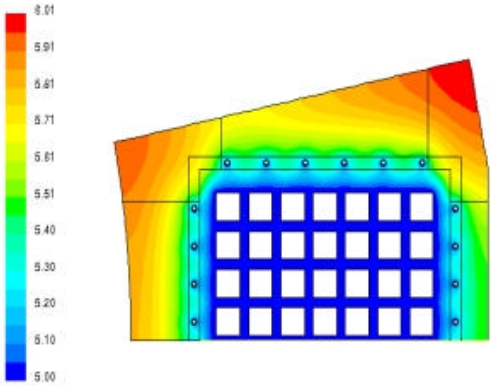

Fig. 7 Temperature distribution after shot (brazing)

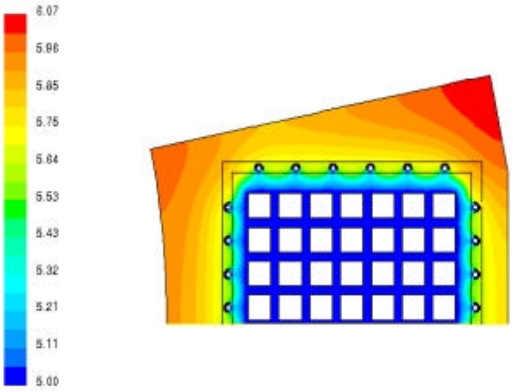

Fig. 8 Temperature distribution after shot (welding)

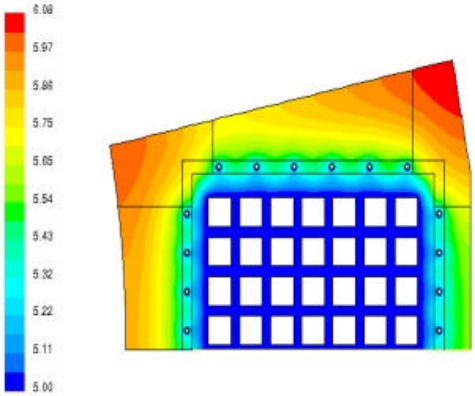

Fig. 9 Temperature distribution after disruption (brazing)

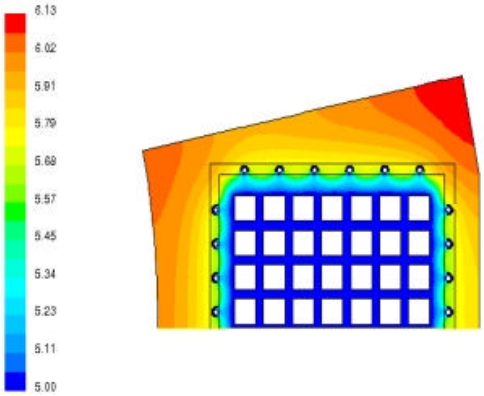

Fig. 10 Temperature distribution after disruption (welding)

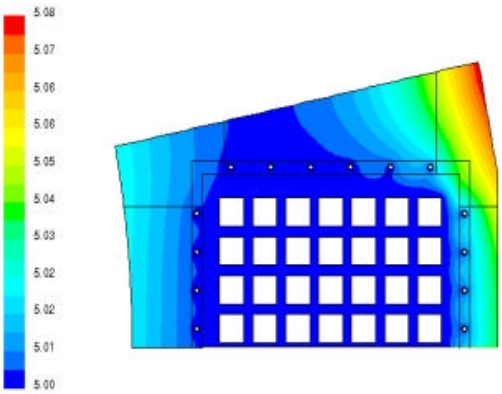

Fig. 11 Temperature distribution after idle (brazing)

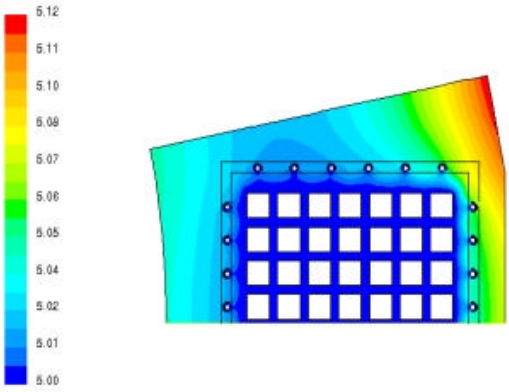

Fig. 12 Temperature distribution after idle (welding)

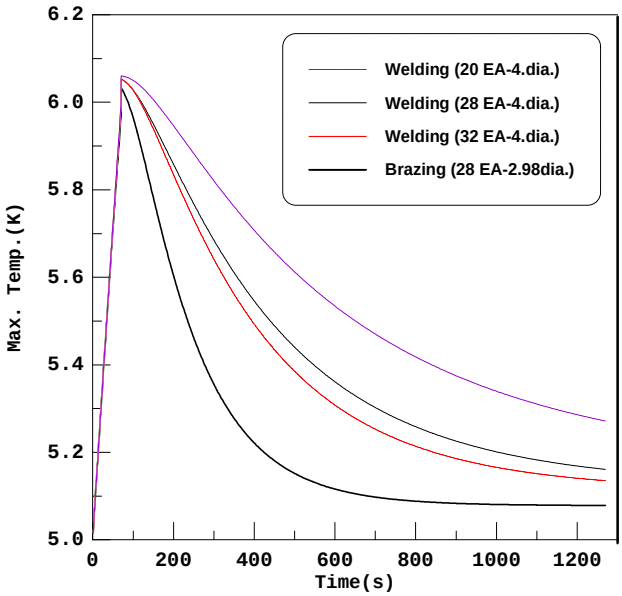

Fig. 13 Comparison of the temperature distribution for different cooling tube specification at unsteady operating conditions

3.2 최종 선정된 TF 냉각튜브 시스템에 따른 Cool Down 열해석

Cool Down 열해석은 3 차원의 TF 구조물과 TF 내에 접합되어 있는 냉각 튜브와의 상호 열전

달을 고려해야 하므로 냉각 튜브내에서 별도의 에너지 보존방정식을 계산해야 한다. 공급되는 헬륨의 유량은 앞서 언급된 조건과 같이 가스 상태와 초임계상태(액상) 모두 128g/s 로 흐르는 것으로 가정하였다. 따라서 현재 튜브가 28 개이므로 각 튜브 당 4.57g/s 의 헬륨유량이 흐른다. 3 차원 Cool Down 에서의 설계 기준을 만족시키는 시나리오는 시행착오를 거친 후 최종적으로 Fig. 14 와 같이 설정되었다. Cool Down 시나리오의 기본 개념은 처음 상온에서는 냉각율을 약 0.9K/hr 로 많이 설정하였으며 시간이 경과함에 따라서는 0.4K/hr 로 서서히 냉각하는 방식을 취하였다. 브레이징과 용접의 냉각튜브 설계방법에 따른 결과와 일본의 실험결과와 같이 비교하였다. Fig. 14 는 시간에 따른 냉각 튜브의 입구온도를 나타낸 것이며 Fig. 15 는 TF 구조물의 시간에 따른 최대 온도차를 나타내고 있으며 강제적으로 50K 에서 4.5K 로 낮추는 것을 제외하고는 브레이징이나 용접 타입 모두 50K 를 만족하고 있다. 여기서 용접 타입의 온도차가 브레이징 보다 더 낮게 나타난 이유는 용접 타입의 열전도율이 브레이징 타입보다 낮으므로 냉각효과가 떨어짐으로 해서 냉각튜브 입 출구의 온도차가 적게 되어 전체적으로 골고루 냉각되는 것으로 보여진다. Fig. 16 은 Cool Down 시의 전체적인 결과를 나타내며 시나리오에 근거하여 양호하게 냉각되고 있음을 볼 수 있다.

본 해석 결과에서 일본의 핵융합설비인 Large Helical Device(LHD)의 Cool Down 실험결과와 비교해본 결과 장치의 규모와 헬륨 냉각유량이 다르긴 하지만 거의 유사한 Cool Down 경향을 보이고 있음을 알 수 있고 본 해석결과의 최대 온도차는 약 20K 인 것에 비해 LHD 에서는 약 40K 에 이르며 Cool Down 완성시기가 KSTAR 것보다 약 5 일이 느린 것으로 나타난다. Fig. 17 은 시간경과에 따른 TF 코일주위의 온도분포를 잘 보여주고 있으며 25 일 이내에 4.5K 까지 전체적으로 냉각되는 것을 알 수 있다.

Fig. 18 은 해석결과에 근거하여 최종 결정된 냉각 튜브사양에 따라서 제작 완료된 TF 선행품이다. 따라서 본 해석결과를 통해 TF 코일내의 냉각용 헬륨의 공급유량과 튜브 사양 선정의 타당성이 검증되었다.

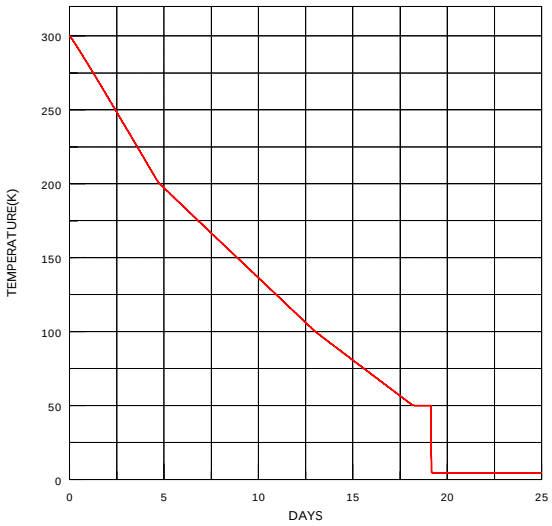

Fig. 14 Cool down temperature curve in TF coil

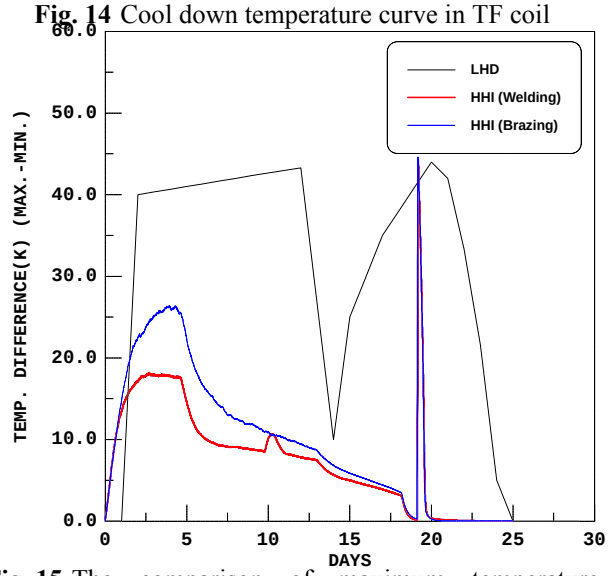

Fig. 15 The comparison of maximum temperature difference in TF coil for different cooling type

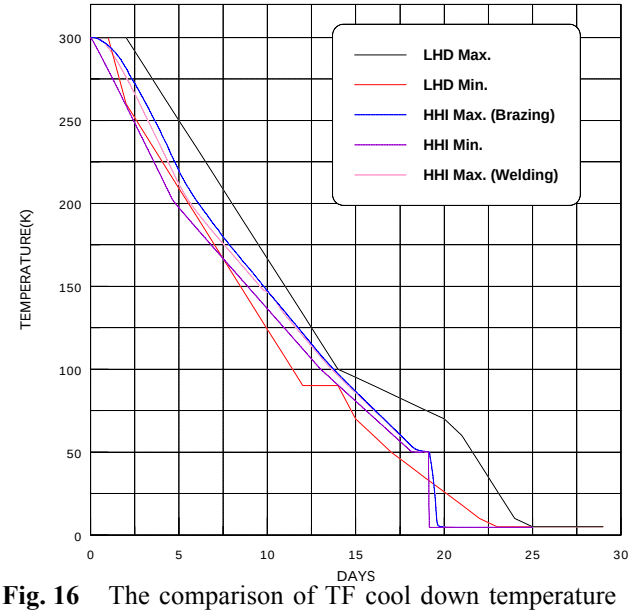

Fig. 16 The comparison of TF cool down temperature for different cooling type

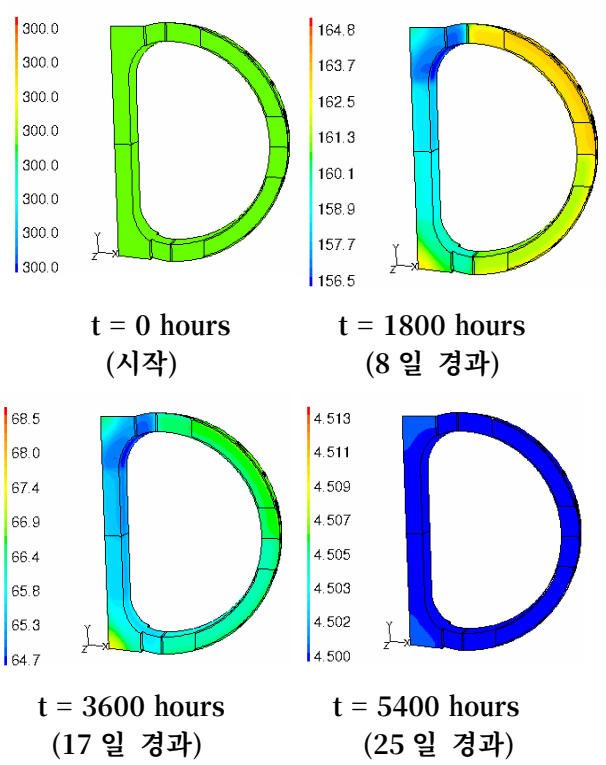

Fig. 17 Cool down procedure in TF coil

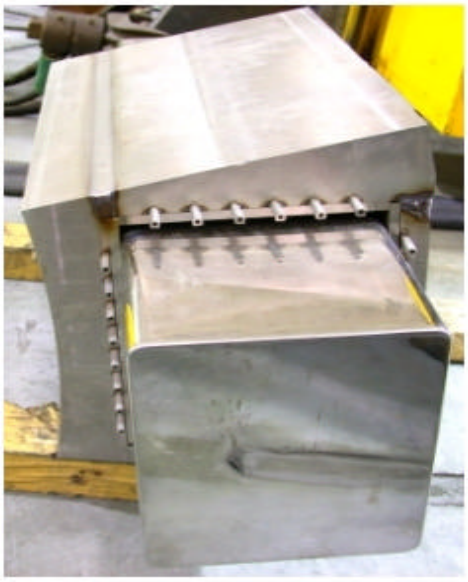

Fig. 18 TF pre-product with welded cooling tube

4. 결 론

본 연구에서는 TF 코일 구조물 냉각 튜브에 대한 공학설계 및 열·유동 해석을 수행하였다.

구조물 냉각 튜브의 공학 설계를 수치적으로 검증하기 위하여 상용 열유동해석 코드인 FLUENT 와 냉각 튜브주위의 열전달에 따른 헬륨의 상태 변화를 계산하기 위해 자체 개발한 프로그램과 연계하여 해석하였다. TF 코일에서는 정상상태 열평형 개념에 기초를 두고 수행한 공학설계를 통하여 4mm 의 내경을 가진 원형 스테인리스강 튜브가 설계되었다. Normal operation 모드에 대한 해석 결과를 통해서 튜브개수가 28 개로 최종 선정되었다.

또한, 선정된 냉각 시스템에 근거한 TF 코일의 3 차원 Cool Down 해석결과는 적절하게 가정한 냉각 시나리오에 대해서 주요 설계기준인 ① 한달 이내 냉각, ② 최대온도차 50K 이내 만족여부, ③ 출구헬륨압력 2bar 이상을 모두 만족시킴으로서 향후 KSTAR 운전시 운전모드 시나리오 데이터로 활용할 수 있게 하였다.

참고문헌

1. H. W. Kim et al., "Thermo-Hydaulic Design and Analysis for TF & CS Coil Structure", KSTAR Tokamak Engineering Report, KBSI, 2003.
2. G. S. Lee et al., "The KSTAR project: An advanced steady state superconducting tokamak experiment," Nuclear Fusion, Vol. 40, pp. 575-582, 2000.
3. S. Cho, " Calculation of Joule Heat and the Temperature Distribution on the TF Coil Structure during Plasma Disruption," Korea Basic Science Institute, Memorandom,
T123-AT0-TH3-010731/SCho-E1-I01, Jul. 2001.
4. C. H. Choi, et al., "Helium and Current Feeder Systems of KSTAR," IEEE Trans. Applied Conductivity, Vol. 11, pp. 2062-2065, March 2001.
5. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 1990.