

# KSTAR장치의 TF MPS 냉각수시스템 시운전 결과

김 영 진\*, 김 상 태\*, 임 동 석\*, 정 남 용\*, 김 동 진\*, 최 재 훈\*, 이 동 근\*, 김 양 수\*,  
박 주 식\*, 이 용 운\*\*

한국기초과학지원연구원 국가핵융합연구소\*, 포스콘\*\*

## The Test Result of Cooling Water System for KSTAR TF MPS

Young-Jin Kim\*, Sang-Tae Kim\*, Dong-Seok Im\*, Nam-Yong Jung\*, Dong-Jin Kim\*,  
Jae-Hoon Choi\*, Dong-Keun Lee\*, Yang-Su Kim\*, Joo-Shik Park\*, Yong-Woon Lee\*\*

\*Korea Basic Science Institute, National Fusion Research Institute, Daejeon, 305-333, Korea

\*\*POSCON Corperation R&D Center, 101 Korea Techno Complex Building, Seoul 136-713, Korea

**ABSTRACT** : The toroidal field magnet power supply (TF MPS) for the KSTAR was constructed in August, 2007 and started the operation for the commissioning in March, 2008. The main role of the TF MPS is to supply the electric power to the TF magnet of the KSTAR. The water cooling components of the TF MPS are 16 stacks, busbar of 70 meters. For the cooling of the TF MPS, the D·I water cooling system was designed and installed. The water cooling system consists of several pumps, heat exchangers, D·I water polishing system and so on. The water cooling system for the TF MPS was tested under the 15 kA current charging condition. In this paper be discussed about the system performance and other parameters.

**Key words:** Korea Superconducting TOKAMAK Advanced Research(차세대초전도핵융합연구장치), TF(Toroidal Field), MPS(Magnet Power Supply), D·I cooling water system (순수 냉각수시스템), Performance Estimation(성능 평가)

### 1. 개요

거대실험장치, KSTAR의 연구목적은 플라즈마 발생 및 제어 등 이를 통한 각종 제반기술을 개발하여, 최종목표인 핵융합발전을 통한 전기에너지 즉, 무한청정에너지 생산이다. KSTAR는 주장치인 TOKAMAK과 가열장치, 전원장치, 냉각장치, 제어장치, 안전장치로 구성된다. 전원장치 중의 TF MPS는 Toroidal field 발생을 위해 TF

초전도 코일에 대전류를 공급하는 장치이다. Toroidal field 발생은 TOKAMAK 장치의 진공 용기 내에서 Plasma를 발생시키기 위해 필요하다. 냉각수(D·I water)는 KSTAR 거의 모든 실험 장치에 공급되어 실험장치의 열을 냉동기와 냉각탑을 통해 대기로 배출한다. MPS에서의 냉각수 역할은 converter panel 내 stack과 대전류를 공급하기 위한 busbars를 운전온도 이하로 유지시키는 것이다. 일반적으로 전원장치는 송풍기를 이용하여 공랭식을 채택하지만 대 전류를 공급하는 KSTAR 전원장치는 운전 중 많은 열이 발생하므로 수냉식을 적용하였다. 전원장치를 수 냉각 할 경우의 주의사항은 냉각수 배관 및 stack에서

† Corresponding author  
Tel.:+ 82-42-870-1951 fax:+ 82-42-870-1959  
E-mail address: k43689@nfri.re.kr

leak가 없어야하며 또한 냉각수의 온도를 실내공기의 노점온도 이상이 되도록 유지하여 배관에 결로가 발생치 않도록 해야 한다. 본 연구에서는 KSTAR 장치 1<sup>st</sup> Plasma에서 TF MPS 전원장치가 15 kA 운전할 때 냉각수설비의 정상운전 확인 및 냉각수의 각 parameters 분석을 통해서 냉각수설비의 성능을 평가하였다.

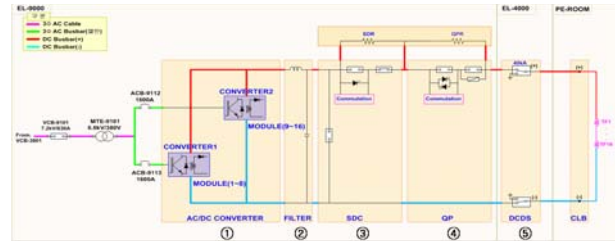
## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 TF MPS panel

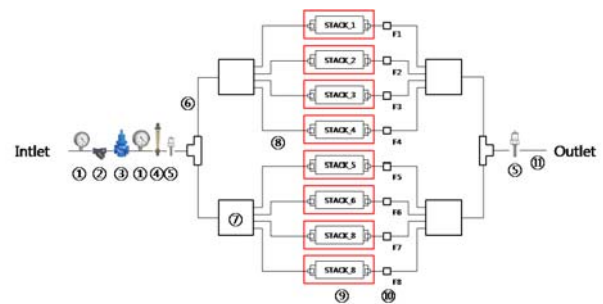
TF MPS panel은 Fig. 1과 같이 AC/DC converter, Filter, SDC(Slow Discharge Circuit), QP(Quench Protector), DCDS(Direct Current Disconnection Switch)로 구성되며 냉각수가 순환하는 곳은 현재 AC/DC converter의 stack과 AC/DC converter, Filter, SDC, QP의 내부 busbars 일부분이다. AC/DC converter는 AC를 DC로 변환하는 기능을 하며 Fig. 2와 같이 converter 2개가 있고 전체 16개의 stack으로 구성된다. 하나의 stack은 IGBT, transformer, diode가 3열로 병렬 구성되고 Fig. 3과 같다. Fig. 4, 5와 같이 IGBT는 측면에 열 교환기를 부착하여 간접 냉각하고 transformer는 냉각수가 직접적으로 냉각하며, diode는 냉각하지 않는다. Filter는 noise 제거 기능을 하고 SDC는 초전도 자석에 저장된 에너지를 정해진 시간 동안 천천히 방전시키는 역할을 하며 QP는 초전도 자석에 quench 발생 시 charge된 전류를 7초 내에 방전시켜 초전도 자석을 보호하는 기능을 한다.<sup>(2)</sup> DCDS는 superconducting magnet과 power supply를 연결하는 스위치이다. 전원장치는 운전 중 전송 선로의 저항으로 인하여 전력손실이 발생한다. 전력손실은 열 부하로 변환되어 장치 및 부품의 온도를 상승시킨다. 각 장치 및 부품은 허용온도 이하가 되도록 냉각수를 순환시켜 장치를 기능을 유지시킨다. Stack의 운전온도는 42℃로서 그 이상에서의 운전은 구성소자의 동작을 불안정하게 하는 원인이 된다.<sup>(1)</sup> 따라서 냉각수 부

하계산 시 냉각수의 환수온도를 먼저 정하고 유량을 결정하였다. 금번 1st Plasma에서는 15 kA 운전을 하였고 냉각수설비도 15 kA 운전에 대한 성능테스트가 되었다.



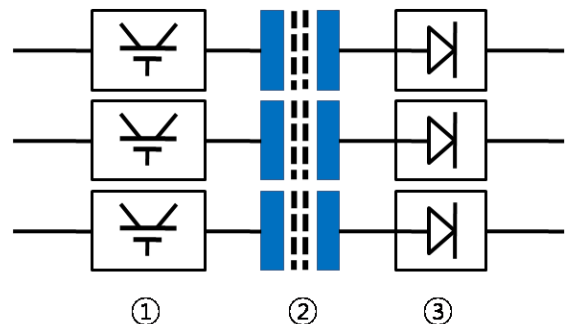
①AC/DC converter ②Filter ③Slow Discharge Circuit ④Quench Protector ⑤Direct Current Discharge Switch

Fig. 1 Block Diagram of TF MPS



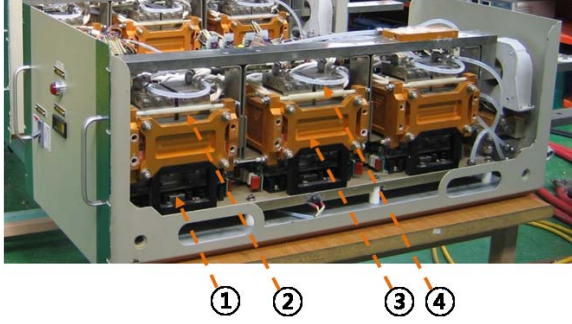
①pressure guage ②strainer ③reduced pressure valve ④flow rate guage ⑤ temperature sensor ⑥1" 40 lpm ⑦distributor ⑧1" 10 lpm ⑨stack ⑩flow rate sensor ⑪ 1 1/4" 80 lpm

Fig. 2 Diagram of cooling water for TF AC/DC converter panel



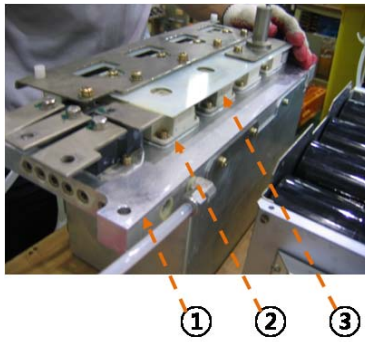
①insulated gate bipolar transistor(IGBT) ②transformer ③diode

Fig. 3 Block diagram of a stack



①diode ②insulated gate bipolar transistor  
③transformer ④heat exchanger plate

Fig. 4 Picture of a stack



①heat exchanger plate ②thermal grease  
③insulated gate bipolar transistor

Fig. 5 Picture of heat transfer device

Table 1 Condition of stack

Condition		Qt'y
Stack number (set)		14
Voltage drop(V)	High-frequency transformer & busbar in panel	2
	Diode	1
	Total	3
Idc(kA)	Output ampere per a stack	3
Cooling water condition (°C)	T <sub>in</sub>	30
	T <sub>out</sub>	42
	ΔT	12

stack의 condition 및 heat load와 냉각수량은 Table 1<sup>(1)</sup>, 2<sup>(1)</sup>와 같다.

### 2.1.2 Busbars

Busbar는 전원장치에서 초전도자석으로 전류를 전송하기위해 설치한 직사각형 모양의 구리 재질 전송 선로이다. 설치된 busbar 총 길이는 70 m로 약 2 m 내외의 가공품들을 연결하는 방식으로 설치하였다. 단면은 가로 150 mm, 세로 50 mm로 제작되었다. 단면에 12 mm hole이 2개 있으며 이 hole로 냉각수를 순환하여 busbars의 온도 상승 문제를 해결하였다. busbars 사이의 냉각수 연결은 배관을 외부로 노출하여 연결하였다. stack의 열 부하는 Table 2<sup>(1)</sup>와 같다.

Table 2 Heat load & C.W flow rate of stack

Item	Units	Qt'y
Power loss per a stack	kW	9
Power loss per all stacks	kW	126
Cooling water per a stack	ℓ/s	0.18
Heat load per all stacks	MW	0.127
Cooling water per all stacks	ℓ/s	2.52
Operation ampere per all stacks	kA	40

Table 3 Condition of busbars

Condition	Units	Qt'y
I	kA	40
specific resistance coefficient of Cu (at 20 °C)	Ω-m	$1.7 \times 10^{-8}$
Area of busbar cross section	m <sup>2</sup>	$7.27 \times 10^{-3}$
Busbars length	m	70

Table 4 Heat load & C.W flow rate of busbars

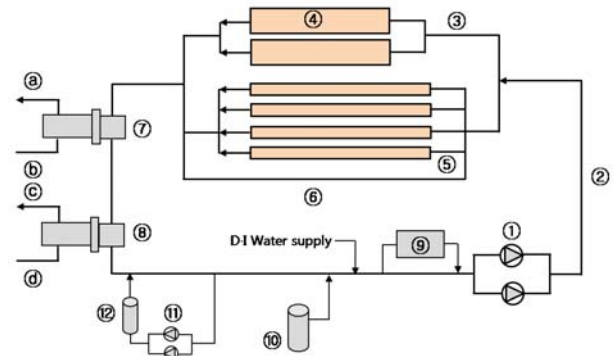
Condition	Units	Qt'y
R	μΩ/m	2.34
Power loss (at 40 kA)	kcal/h · m	3,220
Heat load per all busbars	kcal/h	225,400
Cooling water per all busbars	ℓ/s	2.7
T <sub>out</sub> of cooling water	°C	53.2

busbars의 condition 및 heat load와 냉각수량은 Table 3<sup>(1)</sup>, 4<sup>(1)</sup>와 같다. 냉각수 환수 혼합(panel + busbars)온도는  $(2.52 \text{ lps} \times 42^\circ\text{C} + 2.7 \text{ lps} \times 53.2^\circ\text{C}) \div 5.22 \text{ lps} = 47.79^\circ\text{C}$  이다.

## 2.2 Cooling Water System

냉각수는 전원장치를 수 냉각하는 것이 목적이며 구성은 Fig. 6과 같다. 냉각수는 순수생산시설에서 생산되어 리턴배관을 통하여 보충되며 펌프를 통해서 TF MPS를 순환한다. 열 교환방식은 2단 열 교환방식으로 Pre-cooler, Cooler의 cold side에 각각 냉각탑수와 냉수가 순환한다. polishing system은 전체 순환수의 10%를 순환시켜 냉각수의 이온성분을 제거하여 전기저항 유지가 목적이다. polishing system의 운전제어 interlock parameter는 냉각수 Loop의 열교환기 후단의 온도센서, 실험장치 후단의 순도센서, polishing system의 온도센서 및 순도센서이다. 기동조건은 냉각수온도  $40^\circ\text{C}$  이하, 순도센서  $7 \text{ M}\Omega\text{-cm}$  이하이며 정지조건은 냉각수온도  $45^\circ\text{C}$  이상, 순도센서  $10 \text{ M}\Omega\text{-cm}$  이상이다. UV-Lamp는 냉각수를 살균하여 실험장치 열교환부분에 미생물 번식을 억제한다. TF MPS는 전류 공급 중에 냉각수 순환이 정지하면 TOKAMAK TF 초전도 자석의 전류를 fast discharge 해야 하므로 운전 중에는 냉각수설비에 이상 현상이 발생하지 않도록 해야 한다. fast discharge는 실험장치의 손상을 초래하기 때문이다. 따라서 순환펌프 2대를 설치하여 1대를 stand-by하고 주 펌프가 fault 시엔 예비펌프가 자동으로 기동하여 15초 내에 정상유량을 순환시켜야 한다. 여기서 15초는 냉각수가 정지했을 때 TF MPS 자체에 설치된 유량 감지스위치가 장치를 정지시키는 시간이다. Table 5<sup>(3)</sup>의 값 중 유량은 전류 40 kA 기준이다. 펌프는 입형으로 body는 주철이고 임펠러와 샤프트는 SSC13A이다. 열교환기는 plate형이며 STS 316이다. 수동밸브는 모든 부품이 모두 SCS14A이고 자동밸브는 몸체만 주철이며 다른 부품은 SCS14A이다. 냉각수와 접하는 부분은 경제성을 고려하여 stainless 제품을 사용하였다.

## 2.3 실험방법



- ①cooling water pump ②65 mm STS pipe ③50mm STS pipe ④converter ⑤busbars ⑥by-pass ⑦pre-cooler ⑧cooler ⑨uv-lamp ⑩expansion tank ⑪polishing system pump ⑫polishing bottle
- Ⓐcooling tower water supply Ⓑcooling tower water return( $32^\circ\text{C}$ ) Ⓒchilled water supply Ⓓchilled water return( $7^\circ\text{C}$ )

Fig. 6 Diagram of cooling water system for TF MPS

Table 5 Requirement of cooling water system for TF MPS

Parameter	Units	Qt'y
Flow rate	lps	>5.5
$P_{in}$	$\text{kg}/\text{cm}^2$	<8
$T_{in}$	$^\circ\text{C}$	<30
Resistivity	$\text{M}\Omega\text{-cm}$	>5
Dissolved oxygen	ppm	<8

냉각수는 TF MPS가 초전도자석에 전류를 투입하기 전에 정상운전 상태를 유지하고 있어야 한다. 정상상태란 실험장치의 냉각수 공급유량, 공급온도, 공급전도도, 안정된 배관의 압력분포를 말한다. TF MPS 운전 팀에서는 냉각수의 상태를 감시하기 위한 유량, 온도센서를 설치하고 냉각수 이상현상 발생 시 장치안전을 위하여 interlock 장치를 구축하였다. 냉각수설비는 운전을 시작하면 모든 것이 자동으로 운전되므로 운전자는 이상현상이 없을 시 감시만 하면 된다. 또한 DCS (분산제어시스템)에서는 냉각수의 각 parameter들이 수치와 그래프로 보여주고 저장된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압력분포 및 유량

냉각수설비에서의 압력은 펌프의 성능그래프에서 알 수 있듯이 냉각수 펌프의 순환유량과 밀접한 관계가 있다. Fig. 7의 장치 입구압력(check point 2)은  $7.24 \text{ kg/cm}^2$ 로서 requirement보다 낮으므로 안정적이다. 각 converter의 냉각수량 조절은 냉각수 출구 정유량밸브를 설치하여 80 lpm이 되도록 하였다. 따라서 각 converter 입구 감압밸브의 출구압력이  $6.8 \text{ kg/cm}^2$ ,  $6.25 \text{ kg/cm}^2$ (point 4)이며 서로 다르다. 또한 차압도 converter 1은  $2.7 \text{ kg/cm}^2$ 이고 converter 2는  $2.05 \text{ kg/cm}^2$ 이다. 냉각수의 원활한 순환을 위하여 각 converter와 busbars의 차압을 고려하여 장치입구압력(point 3)을 조정하여 장치출구(point 7)압력을 동일하게 하였다. Fig. 8은 TF MPS 전원장치 전체의 유량으로서 일정하게 유지됨을 보여주고 있다.

#### 3.2 냉각수 순도

polishing system의 pump는 Fig. 9에서 같이  $7 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ 에서 기동하고  $10 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ 에서 정지하였고 장치의 입구와 출구의 순도 변화는 거의 없다. pump 정지 시의 순도 변화는 시간 당  $0.3 \text{ M}\Omega\text{-cm}$  씩 떨어지는 현상을 보였고 약 7시간 30분소요되었다. 순도 향상은 시간 당  $3 \text{ M}\Omega\text{-cm}$  씩 상승하였으며 약 1시간 소요되었다. 실험장치 전 후단에 순도 값이 변화가 거의 없으므로 센서를 전단까지 설치할 필요가 없다고 생각된다.

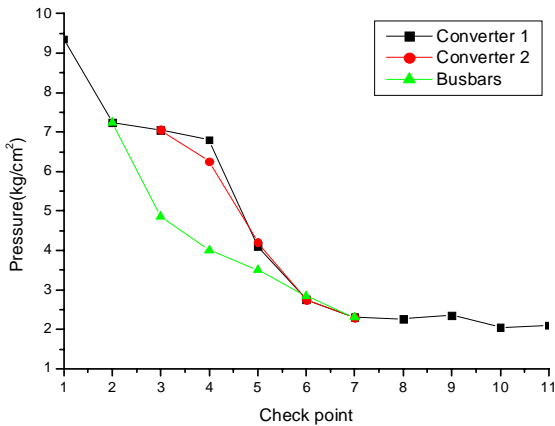


Fig. 7 Pressure distribution curve of piping

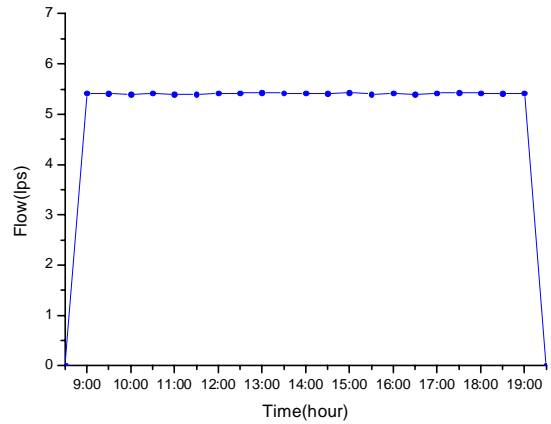


Fig. 8 Flow rate curve

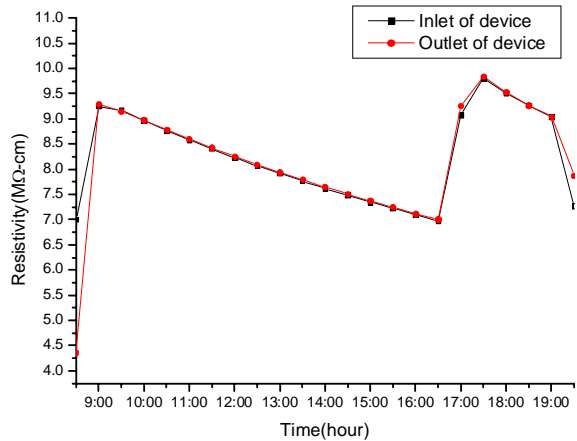


Fig. 9 Resistivity curve

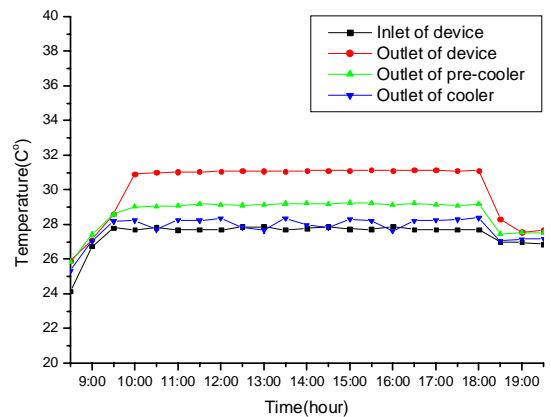


Fig. 10 Temperature curve

#### 3.3 냉각수 온도

TF MPS 전원장치는 continuous load로서 일정한 부하가 지속적으로 발생하며 Fig. 10에서와

같이 장치 입구온도는 27.8℃를 유지하였다. 약 2.2℃의 안전율을 고려하였다. 장치 출구온도는 31.1℃로서 입구온도와의 온도차는 3.3℃가 발생하였다. 온도 커브가 대부분 일정하지만 cooler 출구온도가 oscillation이 있는 이유는 열 교환기 cold side의 chilled water 유량을 조절하는 TCV(온도조절밸브)가 일정한 position에 고정되지 않고 지속적으로 움직였기 때문이다. 이는 장치의 열 부하가 pre-cooler에서 거의 제거되었다는 것을 의미한다.

### 3.4 설비의 열 부하 제거성능

냉각수 순환배관의 주배관은 보온하였지만 장치로의 가지배관은 비 보온 하였다. 장치실의 실내온도는 약 26℃를 유지했으므로 공기로 인한 냉각 및 냉각수 운동에너지는 무시한다. 냉각수가 얻은 열량과  $T_o$ 의 검증은 다음과 같이 표현한다.

$$Q = \dot{m} C(T_i - T_o) \quad (1)$$

여기서  $\dot{m}$ 는 냉각수 질량유량,  $C$ 는 비열,  $T_i$ 는 입구온도,  $T_o$ 는 출구온도를 나타낸다. stack 1개의 손실전력은 다음과 같이 계산한다.

$$P_{loss} = V_{drop} \times I_{dc} \quad (2)$$

$V_{drop}$ 는 stack 한 개당 전압강하 량,  $I_{dc}$ 은 stack 1개당 출력전류 량이다. stack 한 개당 출력전류는 3 kA로서 금번 실험의 출력전류는 15 kA 이므로 stack 14개 중 5개에 전류가 공급되었다. busbars의 손실전력은 다음과 같이 계산한다

$$P = I^2 R \quad (3)$$

여기서  $I$ 는 출력전류,  $R$ 는 busbar의 저항으로 busbar 재료의 비저항계수( $\rho$ )와 단면적( $A$ )의 곱으로 나타낸다. 식(2), (3), (4)들을 통해서 계산한 결과 금번 실험에서 냉각수가 얻은 열량은 총 70,723 kcal/h로서 stack 5개에서 38,880 kcal/h, busbars 70 m에서 31,843 kcal/h이다. 그러나 식(1)을 통하여 실제 실험한 온도차 3.3℃를 적용

한 결과 65,340 kcal/h이다. 이러한 열량 차는 공기에 의한 냉각이 있었다고 판단한다. 장치 출구의 혼합온도는 다음과 같이 표현한다.

$$T_o = \{(\dot{m}_p \times T_{op}) + (\dot{m}_b \times T_{ob})\} \div \dot{m} \quad (4)$$

$\dot{m}_p$ ,  $\dot{m}_b$ 는 stack과 busbars로 순환되는 냉각수량이고  $T_{op}$ ,  $T_{ob}$ 은 stack과 busbars의 출구온도이다. 식 (4)를 통해서 계산된 출구온도는 31.4℃이다. 실험을 통한 출구온도는 31.1℃로서 약 0.3℃가 더 낮게 지시되었다.

### 4. 결론

- (1) 실험장치의 최종목표인 40 kA까지는 아직 실험을 수행하지 못하였지만 15 kA 운전을 통해서 냉각수설비의 성능이 충족함을 알 수 있었다.
- (2) 부하 계산에 의한 열량과 실험을 통한 열량 비교 시 5,383 kcal/h의 차는 공기에 의한 냉각으로 판단되고, 출구온도차 0.3℃도 식(1)에 의거 설계 값과 차이가 발생된 것이다.
- (3) 배관의 압력분포와 유량은 requirement에 적합하며 각 converter의 냉각수 인입배관에 유량계와 출구배관에 정유량밸브를 설치하여 유량 균형을 확보하였다.

### 후기

본 연구는 교육과학기술부 기초기술연구회의 지원으로 수행하였습니다.

### 참고 문헌

1. S. T. Kim, 2008, Technical report of cooling water for MPS TF busbars, Technical report of NFRI, K-KB30-A02-320-001-00
2. J. H. Choi et al., 2008, "Overview of superconducting magnet power supply system for the KSTAR 1<sup>st</sup> plasma experiment," Nuclear Engineering and Technology, Vol 40 No. 6
3. KBSI-SECC, 2001, Engineering design of nuclear fusion special experimental building for KSTAR(1) - Colligation report(special facility-Mechanical Field), KBSI