

## KSTAR 저온 및 구조 계측 시스템 운전 결과

### Operation result of the Cryogenic and Mechanical Measurement System for KSTAR

김영옥<sup>1\*</sup>, 추 용<sup>1</sup>, 요네가와<sup>2</sup>, 방은남<sup>1</sup>, 이태구<sup>2</sup>, 백설희<sup>2</sup>, 홍재식<sup>2</sup>, 이상일<sup>1</sup>, 박갑래<sup>2</sup>, 오영국<sup>2</sup>

Y. O. Kim<sup>1\*</sup>, Y. Chu<sup>1</sup>, H. Yonekawa<sup>2</sup>, E. N. Bang<sup>1</sup>, T. G. Lee<sup>2</sup>, S. H. Baek<sup>2</sup>, J. S. Hong<sup>2</sup>,  
S. I. Lee<sup>1</sup>, K. R. Park<sup>2</sup> and Y. K. Oh<sup>2</sup>

**Abstract:** Korea Superconducting Tokamak Advanced Research(KSTAR) device is composed of 30 superconducting magnets, magnet structure, vacuum vessel, cryostat, current feeder system, and etc. KSTAR device is operated in the cryogenic temperature and high magnetic field. We install about 800 sensors - temperature sensors, strain gages, displacement gages, hall sensors - to monitor the thermal, mechanical, electrical status of KSTAR during operation. As a tremendous numbers of sensors should be installed for monitoring the KSTAR device, the method of effective installation was developed. The sensor test was successfully carried out to check its reliability and its reproduction in the cryogenic temperature. The sensor signal is processed by PXI-based DAQ system and communicated with central control system via machine network and is shown by Operator Interface(OPI) display in the main control room. In order to safely operate the device, any violations of mechanical & superconductive characteristic of the device components were informed to its operation system & operator. If the monitored values exceed the pre-set values, the protective action should be taken against the possible damage. In this paper, the system composition, operation criteria, operation result were presented.

**Key Words:** KSTAR, superconducting coil, cryogenic, strain, displacement, hall, sensor, OPI.

#### 1. 서 론

KSTAR 연구장치는 진공배기, 저온냉각, 초전도자석 전류 인가 실험, 플라즈마 발생 실험, 승온 등 일련의 순서에 따라 운전된다. 운전기간동안 KSTAR 장치가 열적, 기계적, 전기적으로 안정적인지 관찰할 필요가

있고 이를 위해 극저온 고자장 환경에서 신뢰성을 가지는[1] 다양한 종류의 센서를 설치하여 신호를 모니터링 하였다. 극저온의 초전도 자석 모니터링을 위한 온도센서, 냉각수축 및 전자기력에 의한 자석구조물의 변형을 측정을 위한 응력센서 및 변위센서, 자장측정을 위한 홀 센서 등 총 800여개의 센서가 KSTAR 내부에 설치되었다. 센서 신호는 PXI 기반의 DAQ시스템에서 계측되었고 네트워크를 통해 주제어실에서 모니터링 되었다. 각 센서의 신호는 일정 운전 범위를 갖고 운전되며 신호가 범위를 넘어설 경우 경고 혹은 인터록등 KSTAR 장치를 보호 할 수 있는 장치와 연동된다. 본 논문에서는 각 센서 신호를 계측하기위한 시스템 구성과 인터록 기준 도출 배경, 그리고 KSTAR 장치의 초기 운전 기간 동안 저온 및 구조 모니터링용 센서 신호의 측정 결과에 대해 기술하였다.

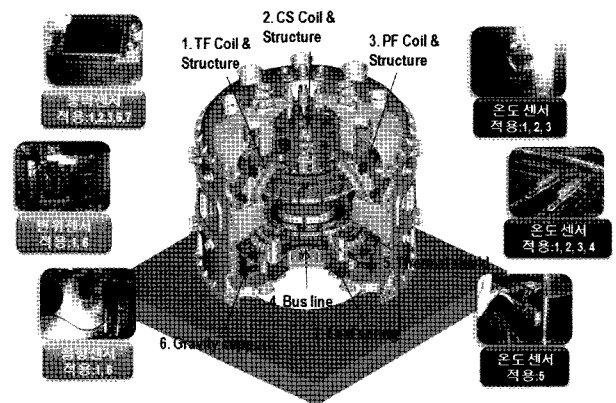


Fig. 1. Status of installed sensors in KSTAR device for temperature and mechanical monitoring.

#### 2. 본 론

##### 2.1. 응력신호 모니터링

##### 2.1.1. 시스템 구성

응력센서는 측정 대상구조물 표면에 부착되어 대상구조물이 받는 응력에 따라 센서의 저항 변화를 읽어 대상구조물이 받는 응력으로 환산하게 된다. 거대 실험 장치이면서 노이즈가 심한 KSTAR장치 내부에 설치된 응력센서는 두 가지 특징이 있다. 첫 번째, 응력센서 부착 방법에 관한 사항으로서 응력센서를 대상구조물에 부착할 때 일반적으로 본드를 사용하고 이 본드를 경화시킬 때 높은 온도에서 긴 시간동안 유지

<sup>1</sup>정 회 원 : 국가핵융합연구소

<sup>2</sup>비 회 원 : 국가핵융합연구소

\*교신저자 : yokim@nfri.re.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 09월 01일

게재확정 : 2009년 09월 01일

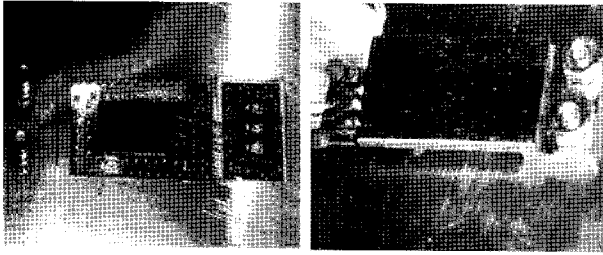


Fig. 2. Active gauge(Left) and dummy gauge(Right) in KSTAR by spot welding method.

Table 1. Operational criterion of strain gauges.

운전단계	Alarm(H)	Alarm(HH)
냉각/승온	$ \epsilon_{TF,CS,PF Str.}  > 2400\mu\epsilon$	$ \epsilon_{TF,CS,PF Str.}  > 3100\mu\epsilon$
	$ \epsilon_{Gravity Support}  > 3200\mu\epsilon$	$ \epsilon_{Gravity Support}  > 4200\mu\epsilon$
	$ \epsilon_{Leaf Spring}  > 700\mu\epsilon$	$ \epsilon_{Leaf Spring}  > 900\mu\epsilon$
플라즈마 운전	상동	상동

할 것이 요구 된다. 하지만 KSTAR 장치와 같은 거대 연구 장치에 적용하기에는 어려움이 많다. KSTAR에 설치될 응력 센서 설치의 효율성을 위해 점용접 방식의 센서 설치 기법을 개발 하여 적용하였다. 0.1mm 두께의 얇은 스테인리스 박판에 응력센서를 본드를 이용해 부착하고 전용 오븐에 넣어 일정시간동안 경화 시킨 후 측정 대상 구조물에 점용접 방법을 이용해 설치하는 방법이다. 신호의 신뢰성 여부를 검사하기 위해 본드로 부착한 센서와 점용접으로 부착한 센서 시편에 동시에 항복강도의 0.5배 응력을 가해본 결과 두개의 응력신호는 6 %이내의 오차를 보였다[1]. 두 번째, 응력센서 신호의 보상에 관한 사항으로 KSTAR와 같이 극저온 고자장 환경에서 동작되는 응력센서는 센서 저항이 온도 및 자장의 영향을 받아 응력신호가 왜곡되게 된다. 이를 보상해 주기위해 주 센서가 설치된 동일한 위치에 보상용 센서(Dummy gage)를 설치하여 신호왜곡을 최소화 하였다. 보상용 센서는 주센서가 설치된 대상구조물과 동일한 재질의 플레이트에 부착되며 동일한 온도, 동일한 자장 환경에 놓이지만 응력에는 자유로운 구조를 가진다. 센서는 측정시스템에서 Quarter Bridge Type2 방식으로 결선되며 보상용 게이지가 온도 및 자장에 의한 왜곡신호를 제거하게 된다. 그림 2는 점용접방법으로 설치된 센서와 보상용 센서의 형상이다.

2.1.2. 운전 기준

운전 기간 동안 KSTAR 장치는 자석구조물의 냉각 수축에 의한 응력과 전자기력에 의한 응력을 받게 된다. KSTAR 저온 냉각완료 후 플라즈마 시나리오 운전에 따른 시뮬레이션 결과 TF구조물이 약300~595 MPa, CS구조물이 약262~443 MPa, PF구조물이 약 182~787 MPa의 응력이 발생되었다[2]. KSTAR 장치의 운전 중 허용 응력 범위는 자석구조물을 구성하고 있는 구조물의 재질과 운전 온도에 따라 정해졌다. TF · PF자석구조물, Leaf spring, Bus support 등은 Stainless steel(STS316LN) 재질로 제작되었고 Gravity support가 CFRP 재질이 사용되어 제작되었다. 또한 TF · PF자석구조물, Bus support, Gravity support 가 4.5 K, Leaf spring이 300 K의 온도에서

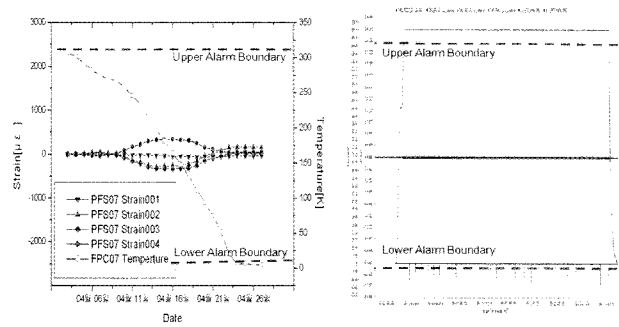


Fig. 3. Strain gauge signals of PF7 magnet structures during cool-down(Left) and plasma operation(Right).

운전된다. 응력신호의 하위 경보(Alarm(H))는 ASME에 근거하여 재료의 설계허용 한도인 Sm으로 규정하였으며 아래와 같은 수식으로 계산된다.

$$Sm = \frac{2}{3} \cdot \sigma_y [MPa]$$

여기서 Sm은 재료의 설계 허용 응력한도를,  $\sigma_y$ 는 항복강도로 STS316LN에 750 MPa을, CFRP에 294 MPa을 적용하였다. 또한 상위 경보(Alarm(HH))는 Sm의 1.3배로 규정하였다. KSTAR 토카막 응력 상태를 모니터링하는 주제어실에서는 자석구조물이 받는 힘이 변형률(µε)로 실시간 모니터링 되므로 아래와 같은 단위 변환이 필요하다.

$$\sigma = \epsilon \cdot E, \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

여기서  $\sigma$ 은 응력[MPa]을,  $\epsilon$ 은 변형률[µε]을, E는 탄성계수로 STS316LN에 206 GPa을, CFRP에 193 GPa을 적용하였다. 표 1은 상기 두 식에 의해 계산된 경보기준값을 나타내고 있다.

2.1.3. 운전 결과

저온냉각 기간 동안 그림 3과 같이 최대 340 µε의 변형률이 PF7자석구조물에 발생했다. 이는 PF7초전도 자석과 TF자석구조물간의 냉각 온도차에 의해 발생한 것으로 자석구조물이 4.5 K로 냉각 완료된 시점부터는 변형률이 0 µε근처에서 유지 되었다. PF6 자석구조물은 최대 280 µε, CS 자석구조물은 최대 480 µε의 변형률이 발생했으며 냉각 진행에 따른 수축량이 비슷한 경향을 보였다. TF 구조물 표면의 변형률은 보상용 센서와 주 센서의 냉각 수축 특성으로 인해 양(+)의 값으로 측정되었으며 500 µε를 초과하지 않았다. 플라즈마 운전 기간 동안 PF7자석구조물에는 50 µε 이하의 변형률이 측정 되었다. 이때 발생한 변형률은 TF초전도 자석으로 15 kA, PF7초전도 자석으로 400 A의 전류가 인가된 상태로 초전도 자석의 전자기력에 의해 발생한 것이다. PF7구조물에 발생한 변형률의 최대값은 하위 경보값의 15 %이하로 측정된 것이며 이외의 구조물-PF6, CS, TF구조물, Gravity support, Leaf spring-도 하위 경보값의 20 % 내에서 측정되어 약 80 %이상의 운전 마진을 갖고 운전되었다.

2.2. 변위신호 모니터링

2.2.1. 시스템 구성

그림 4와 같이 KSTAR 내부에 설치된 변위센서는 0 ~10 mm의 측정 범위를 가지고 있고 구조는 센서 내부에는 4개의 스트레인 게이지가 Full-Bridge 방식으로 결선되어 있어 변위 발생에 따라 내부의 스트레

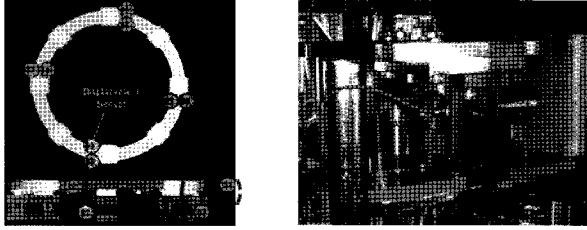


Fig. 4. Displacement gauges in KSTAR.

Table 2. Operational criterion of displacement gauges.

운전단계	Alarm(H)	Alarm(HH)
저온냉각	$ \Delta D_{TRS}  > 1.0\text{mm}$	$ \Delta D_{TRS}  > 1.5\text{mm}$
플라즈마 운전	$ D_{TRS}  > 1.0\text{mm}$	$ D_{TRS}  > 1.5\text{mm}$

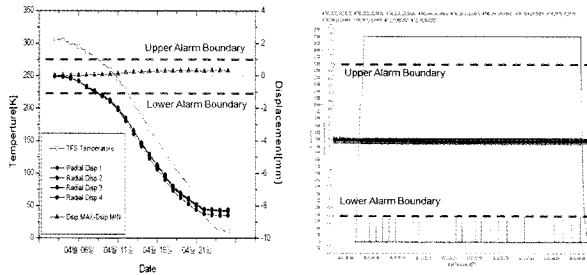


Fig. 5. Displacement gauge signals of Toroidal Ring structures during cool-down(Left) and plasma operation(Right).

인 게이지 저항의 변화량을 환산해 변위량을 측정하게 된다. Full-Bridge를 구성하는 4개의 저항(스트레인 게이지)이 같은 환경에서 구동되기 때문에 고자장 및 극저온환경인 KSTAR 내부에서 사용 시 신호의 자장 보상 및 온도보상이 이루어진다. 계측장치와 연결될 변위센서 신호는 출력값으로 출력되어 이를 변위로 환산해 주어야 한다. 수식은 아래와 같다.

$$\text{변위 [mm]} = \frac{V_{OUT} \times (2 \times 10^6)}{V_{EX} \times Coef}$$

여기서 Vex는 센서 인가전압, Coef는 센서 변위 상수, Vout는 측정되는 전압이다.

2.2.2. 운전 기준

변위센서는 KSTAR 토카막 저온냉각 시 자석구조물의 냉각 수축량을 절대기준점으로부터 [mm]단위의 변위로 측정하고 플라즈마 운전 시에는 전자기력에 의해 발생된 자석구조물의 변위를 측정하게 된다. 이를 위해 10개의 변위센서가 KSTAR 토카막 내부에 설치되었다. 30개의 초전도 자석을 기계적으로 지지하고 있는 Toroidal ring 구조물에 8개(각각 수직방향 4개, 반경방향 4개)가 설치되었고 TF자석구조물의 접선방향으로 2개가 설치되었다. 저온냉각 및 플라즈마 운전 시 변위센서의 운전 기준을 표 2에 정리하였다. 즉 저온냉각 시 Toroidal Ring은 토카막 중심 방향으로 수축이 발생하는데 이때 4방향 수축량의 균일정도를 운전기준으로 규정하고 플라즈마 운전 시에는 절대 변위

량 초과 여부를 운전 기준으로 규정하였다.

2.2.3. 운전 결과

그림 5와 같이 저온냉각 완료 후 Toroidal Ring 구조물의 방사방향의 변위는 계산값에 매우 근접한 8.5 mm로 측정되었고 냉각기간 중 4개 장소의 변위 차 최대값은 0.34 mm로 측정되었다. 이는 자석구조물이 토카막 중심을 기준으로 균일하게 냉각 수축되었음을 보여주고 있다. 또한 플라즈마 운전 기간 동안의 TF초전도 자석 및 PF초전도 자석 전류 인가에 따른 변위 변화량은 0.05 mm이하로 측정되었다. 즉 KSTAR 운전 중 변위신호에 의한 경고발생은 없었다.

2.3. 온도신호 모니터링

2.3.1. 시스템 구성

극저온 상태에서 운전되는 KSTAR 토카막의 온도를 정밀하게 측정하기 위해서 음의 온도계수(dR/dT<0)를 가지는 온도센서를 선정하는 것이 유리하다. 또한 고자장 환경에서도 안정적인 센서 선정이 필요하다. 이를 반영하여 Cernox(Lake shore社)온도센서를 선정하여 설치하였다. 그림 6과 같이 초전도 자석 온도 측정용으로 자석 냉각용 헬륨라인에 온도센서를 부착하였고 자석구조물의 온도를 측정하기위해 구조물 표면에 온도센서를 부착하였다. 극저온을 계측하는 센서이기 때문에 외부로부터 센서로 유입되는 복사열 및 전도열을 최소화 하기위한 센서 보호커버 및 Thermal anchoring 구조를 갖도록 제작하였다. 센서 신호의 정밀 측정을 위해 4단자 결선법을 적용하였고 센서 구동을 위해 10 μA 정전류원이 사용되었다. 상온구간과 극저온 구간의 측정 전압 측정값의 차이로 인한 오차를 줄이기 위해 계인을 차등 적용하였다. 즉 상대적으로 센서 저항이 작은 상온 구역에서는 1000배의 계인을 적용하고 극저온 구역에서는 100배의 계인을 적용하였다.

2.3.2. 운전 기준

주로 금속 재질로 제작된 KSTAR 장치를 4.5 K까지 냉각시키는 과정에서 재료의 특성에 따라 냉각 수축이 일어나게 된다. KSTAR 초전도 자석구조물을 구성하고 있는 스테인리스 스틸은 상온에서 액체헬륨 온도까지 냉각할 경우 0.3 %의 수축이 발생하고 KSTAR 장치와 같이 거대한 실험 장치에서 0.3 %의 수축량은 장치의 변형 및 국부적 응력과대 현상을 초래할 수 있다. 즉 냉각 과정에서 토카막 내부의 급격한 온도 변화는 초전도 자석 및 구조물의 냉각 온도차를 유발하고 곧 수축량의 차이를 발생시켜 기계적 스트레스를 발생하게 한다. 이를 방지하기위해 KSTAR 초전도 자석 및 자석구조물의 온도차를 규정하였다. TF/PF초전도 자석 및 TF초전도 자석구조물의 경우 냉각헬륨 인입구 온도와 인출구 온도차를 50 K이하로 유지함을, PF 구조물의 경우 70 K 이하로 유지함을 원칙으로 운전기준으로 규정하였다. 플라즈마 운전 단계에서는 각 초전도 자석의 온도를 기준온도 이하로 유지함을 원칙으로 하고 있는데 초전도 자석의 재질, 전류 충전량을 고려하여 규정하였다. NbTi 초전도 선재로 제작된 PF6~7 자석과 버스라인의 온도기준을 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재로 제작된 TF 자석& PF1~5 자석온도 기준보다 상대적으로 엄격하게 규정하였다. 표 3은 KSTAR 초전도 자석의 운전 기준값을 나타내고 있다.

2.3.3. 운전 결과

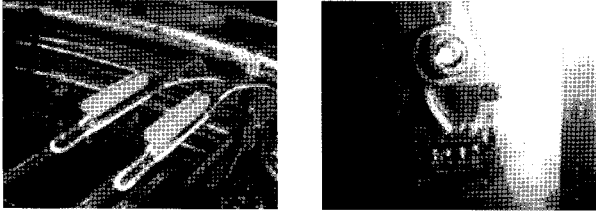


Fig. 6. Temperature sensors in KSTAR. for magnets(Left) and its supporting structures(Right).

Table 3. Operational criterion of temperature sensors.

운전단계	Alarm(H)	Alarm(HH)
저온냉각	[Coil out - Coil in] > 40K Str. - Str. in] > 40K PF 6-7 Str. - Str. in] > 60K	[Coil out - Coil in] > 50K Str. - Str. in] > 50K PF 6-7 Str. - Str. in] > 70K
플라즈마 운전	TF Coil, TF Bus >5.5K PF1-5 Coil >7.0K PF6-7 Coil, PF Bus >6.0K	TF Coil >8.0K TF Bus >6.0K PF1-5 Coil >9.0K PF6-7 Coil, PF Bus >7.0K

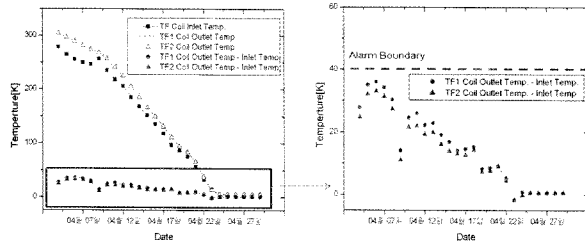


Fig. 7. Temperature data of TF magnet during cool-down.

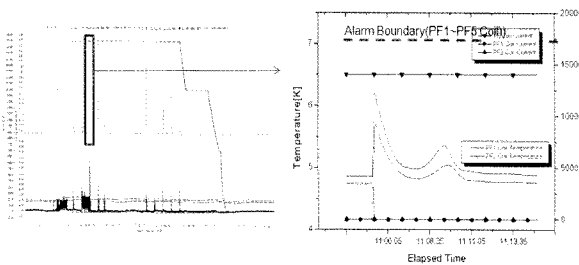


Fig. 8. Temperatures data of TF and PF magnet during plasma operation.

그림 7과 같이 저온냉각 중 TF 자석의 냉각 헬륨의 인입구와 인출구 온도 차의 최대값은 약 35 K로 측정되었고 냉각이 지속됨에 따라 온도차는 줄어들어 냉각 완료 후에는 온도차가 0이 되었다. PF 자석도 TF 자석의 냉각 경향과 유사했으며 23일간의 저온 냉각기간 동안 온도차 50 K를 초과하지 않았다.

KSTAR 장치에 플라즈마를 발생시키기 위해 TF 자석에 최대 15 kA가 인가된 상태에서, PF1~7 자석에 최대 3 kA의 전류가 시나리오에 따라 인가된다. 그림 8은 플라즈마 운전 시 TF자석 및 PF자석의 헬륨 outlet 온도 분포를 보이고 있다. TF자석에 14 kA의 전류를 충전 및 방전할 때 AC loss에 의해 TF자석의 온도가 약 0.03 K증가하고 전류 14 kA유지 시간동안 온도 변화는 없었다. PF자석에 플라즈마 시나리오에 의한 전류를 인가했을 때 TF자석의 온도는 AC loss

및 TF 구조물의 Eddy current에 의해 약 0.01 K이하의 온도 상승을 보였다. 또한 동일한 시간의 PF자석 온도는 최대 1.4 K의 상승을 보였고 초기 온도로 복귀되는데 약 15분이 소요되었다.

#### 4. 결 론

KSTAR장치의 온도 및 기계적 상태를 모니터링 하기 위해 장치 내부에 응력센서, 변위센서, 온도센서, 자장센서등 총 800여개의 센서가 설치되어 그 신호가 모니터링 되었다. 모니터링 시스템 구성을 위해 적합한 센서를 선정, 효율적으로 설치할 수 있는 방법을 개발, 극저온 고자장 환경에서 신호의 노이즈 보상기법을 개발하여 적용하였다[1]. 각 센서 신호는 KSTAR장치의 안정적인 운전의 기준이 되는 설정값을 가지며 신호가 설정값을 초과할 경우 인터록 장치와 연동하여 KSTAR 장치의 보호조치가 취해진다. KSTAR 장치의 저온 냉각 및 플라즈마 운전기간동안 응력, 변위, 온도의 센서 신호는 설정된 기준값을 초과하여 측정되지 않았다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육·과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Y. O. Kim, C. H. CHOI, B. C. KIM, W. C. KIM, N. I. HER, J. W. SA, J. W. CHOI, J. H. CHOI, J. S. HONG, Y. CHU, J. S. BAK, "Local Instruments of the KSTAR Tokamak", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, pp. S236 ~S239, December 2006.  
 [2] H. J. Ahn, "TF Magnet Structural Analysis", KSTAR SC Magnet System Workshop Presentations, Naka, Japan, p. 278~P.345, Dec., 2001.

#### 저 자 소 개



김영옥(金榮沃)  
 1975년 6월 8일생, 2002년 한국기술교육대학교 공대 전기공학과 졸업(공학사), 현재 국가핵융합연구소 장치운전팀 선임 기술원.



추 용(秋 龍)  
 1970년 10월 24일생, 1993년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 2000년~2002년 삼성종합기술원 전문연구원, 2003년~현재 국가핵융합연구소 책임연구원.



요네가와(米川啓文)  
1971년 12월 16일생, 2000년 일본 요코  
하마국립대 대학원 전자정보공학전공(공  
학박사), 2000년-2002년 삼성종합기술원,  
2003년-현재 국가핵융합연구소 연구원.



홍재식(洪在植)  
물리전공 현재 국가핵융합연구소 연구원  
KSTAR Interlock system 개발, 및  
Operation.



방은남(房恩男)  
1975년 3월 26일생, 1998년 아주대 자  
연과학대 물리학과 졸업, 2002년 동 대  
학원 분자과학기술학과 졸업(이학석사),  
현재 국가핵융합연구소 연구원.



이상일(李相一)  
1971년 3월 31일생, 2007년 충남대학교  
컴퓨터공학 시스템소프트웨어전공(석사수  
료), 현재 국가핵융합 연구소 선임기술원.



이태구(李泰九)  
1977년 6월 25일생, 2003년 배재대 컴  
퓨터 공학과 졸업, 현재 국가핵융합연구  
소 제어기술팀 기술원.



박갑래(朴甲來)  
2004년 한밭대학교 전기공학과 공학석  
사, 현재 국가핵융합연구소 책임기술원  
및 KSTAR 장치운전팀장.



백설희(白雪姬)  
1975년 11월 27일생, 1998년 한국과학기술  
원 산업디자인학과 졸업, 1998년-2002  
년 삼성종합기술원 선임연구원, 현재 국  
가핵융합연구소 제어기술팀 선임연구원.



오영국(吳永國)  
1966년 9월 20일생, 1989년 서울대 공대  
원자핵공학과 졸업, 1999년 동 대학원 원  
자핵공학과 졸업(공학박사), 1993년 한국  
기초과학지원연구원 연구원, 1995년부터  
현재까지 국가핵융합연구소 책임연구원.