

## 펄스전류 운전에 따른 KSTAR PF 초전도자석의 켄치 분석 및 켄치 검출 시스템 운전 특성

### Quench Analysis and Operational Characteristics of the Quench Detection System for the KSTAR PF Superconducting Coils

추 용<sup>1\*</sup>, 요네가와<sup>2</sup>, 김영욱<sup>1</sup>, 이현정<sup>1</sup>, 박갑래<sup>2</sup>, 오영국<sup>2</sup>

Y. Chu<sup>1\*</sup>, H. Yonekawa<sup>2</sup>, Y. O. Kim<sup>1</sup>, K. R. Park<sup>1</sup>, H. J. Lee<sup>2</sup>, and Y. K. Oh<sup>2</sup>

**Abstract:** The quench detection system of the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) primarily uses the resistive voltage measurement due to a quench. This method is to detect the resistive voltage generated by a quench, which is continuously maintained above the preset voltage threshold for a given holding time. As the KSTAR PF (Poloidal Field) coils are operated in the pulse current mode, the large inductive voltages are generated. Therefore the voltage threshold and the quench holding time should be determined by considering both the inductive voltages measured during the operation, and the maximum conductor temperature rise through the quench analysis. In this paper, the compensation methods for minimizing the inductive voltages are presented for the KSTAR PF coils. The quench hot spot analysis of the PF coils was carried out by the analytical and numerical methods for determining the proper values of the quench voltage threshold and the allowable quench protection delay time.

**Key Words:** KSTAR, quench, hot-spot.

### 1. 서 론

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 초전도 자석 계통은 16개의 TF (Toroidal Field) 코일, 7쌍의 PF (Poloidal Field) 코일, 전류 공급을 위한 VCCL (Vapor-Cooled Current Lead) 및 초전도 버스라인으로 구성되어 있다 (그림 1). 16개의 TF 코일은 직렬로 연결되어 있으며, 정격 전류가 35.2 kAdc 이다. PF 코일은 총 7쌍으로 "Shot" 단위로 전류가 인가되며 전류는 DC 가 아닌 펄스의 형태로 공급된다[1]. 현재 고려된 플라즈마 전류 2 MA, 20초 유지를 위한 기준 시나리오에 따르면 PF 코일에 흐르는 전류의 최대값은 20.83 kA@PF2 이며, 전류 변화율은 최대 61.73 kA/s @PF4에 달한다.

KSTAR 초전도 자석 계통의 1차 켄치 검출 방식은 전압 검출 방식으로 켄치에 의해 발생하는 저항에 의한 전압강하를 검출하는 것이다.

켄치 검출기는 전압문턱값 및 켄치유지시간을 설정함으로써 켄치를 판단하고 보호시스템이 가동될 수 있도록 조치를 취해야 한다. 그러나 DC 운전을 하는 TF 코일과 달리, PF 코일은 펄스운전으로 수행되기 때문에 발생하는 코일의 유도전압은 일반적으로 매우 크게 된다. 따라서 유도전압성분과 켄치에 의해 발생하는 저항전압성분의 구분이 절대적으로 필요하다. 이를 위해 PF 켄치 검출 시스템에서 유도전압성분을 최소화하도록 시스템이 구성되어야 한다[2-3]. 또한 유도전압성분이 최소화되었다고 완전히 제거될 수 없다. 하드웨어적으로 유도전압을 최소화시킴과 동시에 켄치 전압 검출기의 문턱값 및 유지시간을 조정하여 유도전압 성분에 의한 켄치 전압 검출기의 오동작을 방지하여야 한다. 켄치 전압 문턱값이 크고, 유지 시간이 길다면 유도전압 성분을 제거하는 데 있어 효과적일 수 있지만 켄치 발생시 초전도체의 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 유도전압 및 켄치에 의한 초전도체 안정성을 고려하여 켄치 전압 문턱값 및 유지시간을 설정하는 것이 필요하다. 한편 PF 운전 중 SoR (Start of Ramp-up) 과정동안 발생하는 매우 급격한 전류변화는 유도전압을 켄치 검출 문턱값 이하의 수준으로 제한하기가 매우 어려울 수도 있다. 이러한 경우를 대비하여 급격한 전류변화를 수반하는 SoR 단계에서 켄치 검출을 중단하고 전류의 변화가 크지 않은 SoF (Start of Flattop) 단계에서 켄치 검출을 재개하는 방법도 고려되어야 한다.

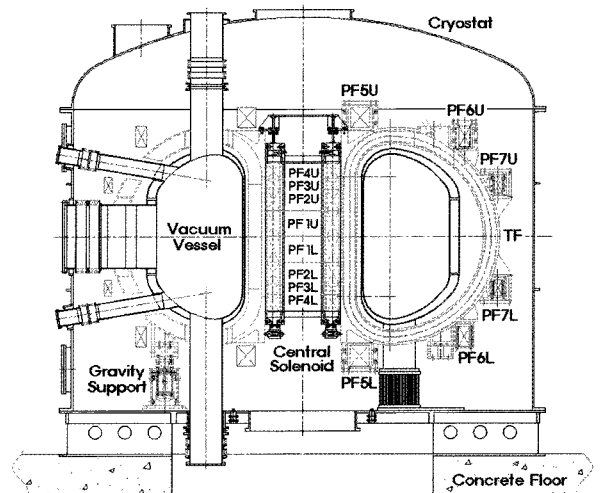


Fig. 1. KSTAR superconducting magnet system.

<sup>1</sup>정 회 원 : 국가핵융합 연구소

<sup>2</sup>비 회 원 : 국가핵융합 연구소

\*교신저자 : ychu@nfri.re.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 08월 21일

게재확정 : 2009년 08월 21일

이를 위해 본 논문에서는 KSTAR PF 초전도자석 계통의 퀘칭 전압 검출을 위한 기준값인 퀘칭 전압 문턱값과 퀘칭 유지 시간을 "Quench Hot Spot"에 대한 분석적인 해석과 Cryosoft사의 Gandalf 코드를 이용한 수치적인 퀘칭 해석을 통해 설정하였다[4]. 퀘칭 검출 파라미터인 퀘칭 검출 문턱값과 지연시간은 "Quench Hot Spot"을 통해 설정하고 퀘칭의 전파에 따른 저항 상승, 온도분포 등은 Gandalf 코드에 의해 분석될 수 있다. 또한 "Quench Hot Spot"에 의한 해석결과는 실제보다 높은 악영향을 가정하기 때문에 퀘칭 검출/보호 시스템의 운용에 마진을 확보할 수 있다. 마지막으로 KSTAR PF 코일의 퀘칭 전압 검출을 위한 하드웨어 시스템에 대해 서술한 후, 운전 특성을 2008년 수행된 1차 KSTAR 장치의 시운전 데이터를 통해 분석하였다. 최종적으로 해석결과 및 운전데이터의 분석을 통해 추후 운전에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

## 2. KSTAR PF Coil 퀘칭 분석

퀘칭 전압 검출은 퀘칭에 의해 발생하는 저항성 전압의 문턱값과 그 전압값 이상으로 일정시간 유지해야만 보호시스템의 가동이 착수된다. 따라서 퀘칭 발생 후 문턱값 및 유지시간에 따른 초전도자석의 퀘칭 해석을 수행하였다. 퀘칭은 "Hot spot analysis"의 분석적 방법과 Gandalf 코드에 의한 1-D 수치해석을 사용하였다. Hot-spot 해석은 퀘칭 발생 후, 퀘칭 발생 초기 지점에서의 최대 온도를 계산하는 데 사용된다. 이는 단열상태를 가정하기 때문에 해석결과는 실제보다 큰 값을 보여준다. 이 값을 Gandalf 코드에 의한 해석결과와 비교분석하여 그 해석결과의 타당성을 검증하였다. 그림 2는 2 MA의 플라즈마 전류, 20초 운전을 위한 PF 전류의 기준 운전 시나리오를 보여주고 있다. 모든 PF 전류는 직류상태로 충전 (IM : Initial Magnetization) 된 후, t=14초에 60ms 동안 Blip 운전을 수행하여 플라즈마를 생성시키는 SoP (Start of Plasma Initiation) 단계를 거쳐, t=14.06초부터 t=19.56초까지 플라즈마의 전류를 2 MA까지 끌어올리기 위한 SoR (Start of Ramp-up) 단계를 수행하게 되면 t=19.56초부터 t=38.26초까지 20초 동안 2 MA의 플라즈마 전류를 일정하게 유지하는 SoF (Start of Flattop) 단계에 다다른다. 이 때 Blip 운전에 있어 최대 전류 변화율을 PF2 코일에서 발생하여 그 값은 대략 -81 kA/s 에 이른다. 또한 SoR 단계에서 최대 전류 변화율도 PF2 코일에서 -3.74 kA/s 이고, SoF에서는 최대 전류 변화율은 모두 0.3 kA/s 이하이다. t=38.26초부터 t=44.26초까지는 플라즈마를 끄기 위한 단계 (EoP : End of Plasma)로 PF 전류변화율은 대략 3 kA/s 이내로 제어된다.

### 2.1. IM 단계에서의 PF 코일 퀘칭 해석

IM 단계에서 PF 코일의 퀘칭 검출은 TF 퀘칭 검출과 동일하다. PF 코일 도체에서 전류 크기에 따른 퀘칭 발생시 최대 온도 상승은 식(1)과 같이 계산되어질 수 있다. 여기서, C는 total volumetric heat capacity로써 복합초전도체의 경우 식(2)로 표현이 된다.  $\rho_{st}$  는 copper resistivity,  $f_{st}$  는 도체에서의 copper fraction, 그리고 I 는 cable operating current 이다. 식(1)의 우변항은 M.I.I.Ts (Mega-Ampere-Ampere-Turns)이며, 좌변항에서 "Z function" 은 순수히 초전도체의 구성 재료에 의한 "Material property"이다. 따라서 식(1)을

풀면 퀘칭 발생에 따른 최대 온도 상승값을 계산할 수 있다.

$$f_{st}A_{cd} \times \int_{T_{op}}^{T_{max}} \frac{C}{\rho_{st}} dT = f_{st}A_{cd}^2 \times Z(T_{max}, T_{op}) = \int_0^{\infty} I^2 dt = M.I.I.Ts \quad (1)$$

$$C = \frac{\sum_i A_i C_i}{\sum_i A_i} = \sum_i f_i C_i \quad (2)$$

식(1)의 M.I.I.Ts는 식(3)과 같이 표현되며,  $I_0$ 는 초기 전류,  $t_{qpd}$ 는 퀘칭 발생 시점부터 에너지의 고속 방전이 시작되는 시점까지의 시간 간격으로 quench protection delay time으로 명명하며,  $t_d$ 는 전류의 고속 방전 시정수( $t_d$ )로서 KSTAR PF 코일에서 4s로 설정되어져 있다.

$$M.I.I.Ts \approx I_0^2 \times (t_{qpd} + t_d/2) \quad (3)$$

그림 3에서는 KSTAR PF 코일에서의 M.I.I.Ts와 퀘칭 발생에 따른 최대 상승 온도값을 나타내고 있다. 퀘칭 발생시 최대 온도 상승은 온도상승에 따른 열변형을 최소화하여 초전도체의 성능저하가 발생하지 않도록 150 K 이하로 제한되어야 한다. 이 때 PF 코일에서의 M.I.I.Ts 값은 대략  $2.4 \times 10^9$  [A<sup>2</sup>s] 이하로 될 수 있도록 퀘칭 검출/보호가 수행되어야 한다. IM 단계에서는 운전전류가 DC로 운전되고, 또한  $t_d$ 는 4s로 정해져 있기 때문에  $t_{qpd}$ 를 입력변수로 하여 퀘칭 검출 시스템의 오동작을 방지하면서 퀘칭 검출을 효과적으로 수행할 수 있도록 설정해야 한다.  $t_{qpd}$ 는 식(4)과 같이 표현되며, 여기서  $t_{qd}$ 는 퀘칭 발생 후 퀘칭 전압이 퀘칭 전압 검출기의 문턱값까지 도달하는데 걸리는 시간을,  $t_w$ 는 문턱값까지 상승된 전압이 퀘칭 저항에 의해 발생된 전압을 확인하기 위한 퀘칭 유지 시간, 그리고  $t_{sw}$ 는 퀘칭 검출기에서 발생된 퀘칭 인터록 신호에 의해 에너지 덤프를 위한 퀘칭 보호 FDU (Fast Discharge Unit)의 스위칭 시간이다.  $t_{qd}$ 는 운전 전류의 크기와 퀘칭 전압 문턱값의 설정값과 관련되어진다. 운전 전류가 클수록 퀘칭에 의한 상전도 전파속도가 커지고 그에 따라 퀘칭 전압의 상승률도 커지게 되므로 이 시간은 감소한다.

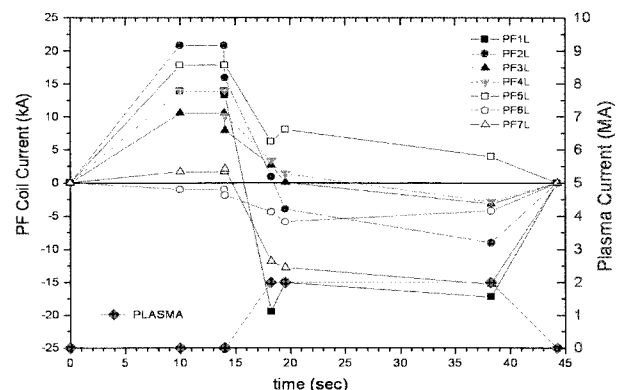


Fig. 2. Reference scenario of PF coils for  $I_p=2MA$ , 20s.

또한 퀘칭 전압 문턱값을 크게 설정하면 이 퀘칭 검출 시간도 같이 증가하게 된다.  $t_w$ 는 스파이크성 전압 노이즈에 의해 퀘칭 전압 검출기에 측정 전압값이 순간적으로 퀘칭 전압 문턱값을 넘게 될 가능성이 있고 이럴 경우에 오동작을 유발할 수 있다. 따라서 퀘칭 유지 시간을 설정하여 이러한 스파이크성 전압 노이즈에 의한 오동작을 제거하고자 설정한다. 이  $t_w$ 가 클수록 오동작의 가능성은 줄어들기 때문에 위의 M.I.I.Ts 해석에 의해 최적의  $t_w$  값을 찾는 것이 매우 중요하다.

$$t_{qpd} = t_{qd} + t_w + t_{sw} \quad (4)$$

표 1은 IM 단계에서 퀘칭 발생 시점부터 코일 에너지가 고속 방전(시정수 4s)되는 시점까지의 지연시간에 따른 M.I.I.Ts 이다. 표에서 보듯이 KSTAR PF 코일의 IM 단계에서 PF2의 전류가 20.83 kA로 가장 높기 때문에 가장 큰 M.I.I.Ts 값을 보여주고 있다. PF2 코일에서 퀘칭 발생 시점 퀘칭 보호 지연( $t_{qpd}$ )이 대략 3.3s (M.I.I.Ts ~ 2.4)가 되면 퀘칭 발생 지점에서 대략 온도가 150 K 된다. KSTAR PF2 코일의 퀘칭 해석을 CICC (Cable-In-Conduit Conductor)의 열수력 수치 해석 코드인 Gandalf 코드를 사용하여 퀘칭해석을 수행하였다. 이를 통해 퀘칭에 의한 상전도 저항의 상승 및 그에 따른 퀘칭 전압, 그리고 퀘칭 발생 초기 지점에서의 온도 및 내부 압력 상승, 퀘칭에 의한 초임계 헬륨 채널의 출구에서의 온도 변화를 분석하였다. 이 분석을 통해 IM 단계에서 퀘칭 전압 문턱값 및 퀘칭 유지 시간의 최적값을 설정하고자 하고자 하며, 또한 "Hot spot" 해석의 결과와 비교하여 그 분석의 타당성을 검증하고자 하였다. Gandalf 코드에 입력되는 KSTAR PF 코일에 사용된 초전도체의 사양을 표 2에 표시하였다[5]. PF 도체에 사용된 초전도체 케이블의 결합손실 시정수( $\tau$ ) 값은 60 ms 이내이며, 안정화동의 RRR (Residual Resistivity Ratio)는 100 이상이다. PF2 코일은 총 8개의 DP (Double Pancake)로 구성되어 있으며, 총 헬륨채널은 8개이다. 한 채널의 길이는 64.5 m 이며, 각 채널의 인입부에 압력과 온도가 6 bar, 4.5K의 초임계 헬륨이 공급되며, 출구는 4 bar로 운전된다. PF2 코일의 전류는 10초 동안 20.83 kA까지 다다르며, 그 이후 DC로 유지한다고 가정하였다. 전류 변화에 따른 AC 손실은 결합손실과 히스테리시스 손실이 코드에 적용되었다. 결합손실과 히스테리시스 손실은 아래의 식(5)과 식(6)에 의해 계산되었다[6].

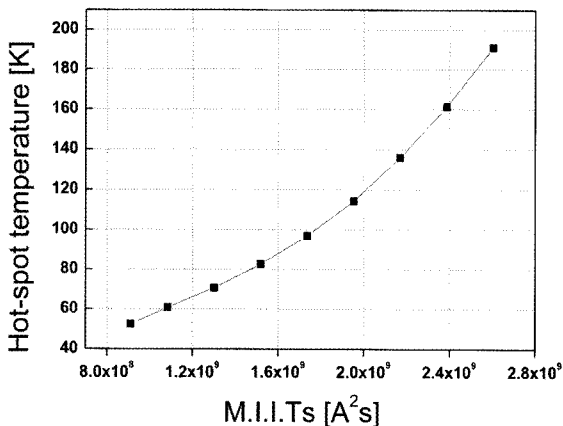


Fig. 3. Hot spot temperature with respect to M.I.I.Ts when a quench occurs for PF coil conductor.

Table 1. Calculated M.I.I.Ts of each PF coil with respect to quench protection delays at IM stage.

PFC	$t_{qpd}$ [s]			
	1 [ $\times 10^9 A^2s$ ]	2 [ $\times 10^9 A^2s$ ]	3 [ $\times 10^9 A^2s$ ]	4 [ $\times 10^9 A^2s$ ]
PF1	0.5788	0.7717	0.9647	1.1576
PF2	1.3017	1.7356	2.1694	2.6033
PF3	0.3345	0.4461	0.5576	0.6691
PF4	0.5788	0.7717	0.9647	1.1576
PF5	0.9569	1.2759	1.5949	1.9139
PF6	0.0031	0.0042	0.0052	0.0062
PF7	0.0084	0.0112	0.0139	0.0167

Table 2. Specification of superconductor for KSTAR PF coil conductor.

Parameter	Units	PF Conductor
Cu/Non-Cu		1.5:1
$A_{conduit}$	mm <sup>2</sup>	179.2
$D_{strand}$	mm	0.78
$n_{sc-strands}$		240
$n_{cu-strands}$		120
$h_{conduit}$	mm	22.3
$w_{conduit}$	mm	22.3
$t_{conduit}$	mm	2.41
$A_{cu}$	mm <sup>2</sup>	132.7
$A_{non-cu}$	mm <sup>2</sup>	48.25
$A_{Hecond}$	mm <sup>2</sup>	111.4

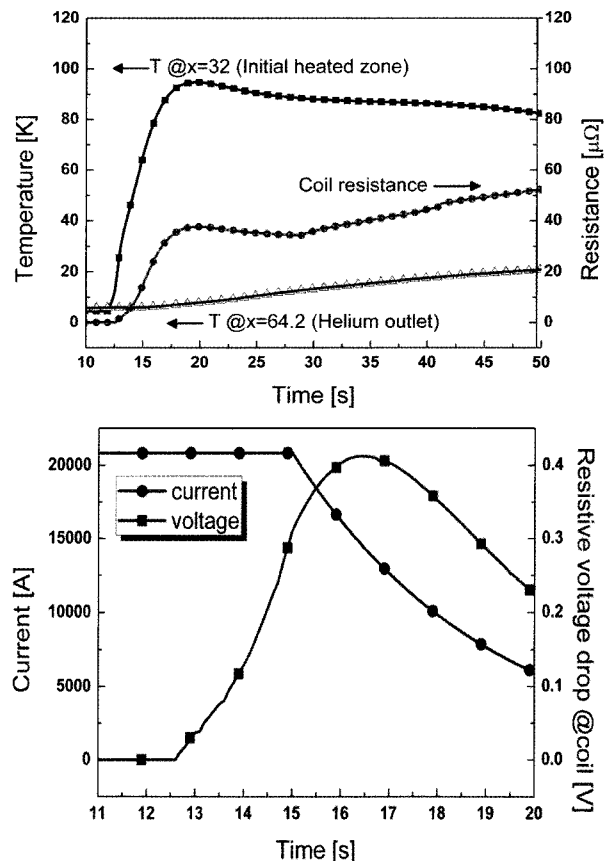


Fig. 4. Analysis results of PF 2 coil's quenching when the operating current is 20.38 kA and the quench protection delay( $t_{qpd}$ ) is 2.5s.

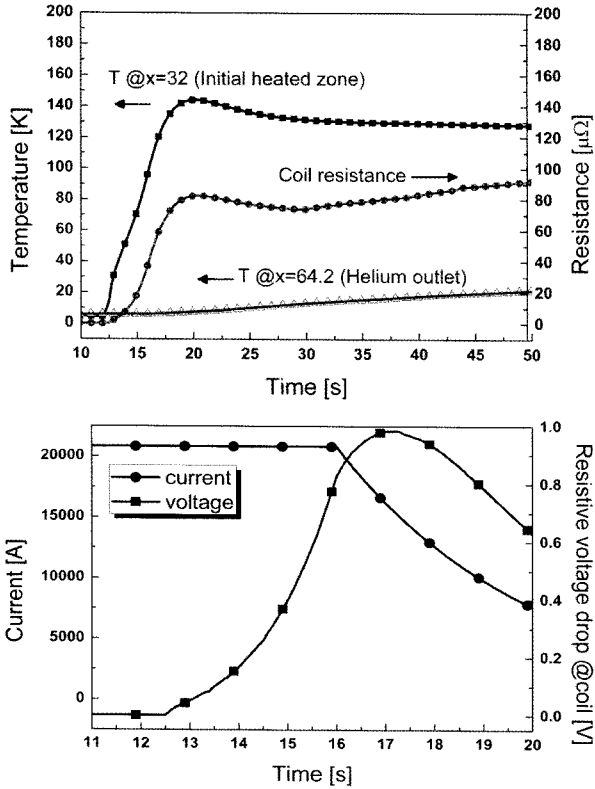


Fig. 5. Analysis results of PF 2 coil's quenching when the operating current is 20.38 kA and the quench protection delay( $t_{qpd}$ ) is 3.5s.

$$Q_{cl} = \frac{B_m^2 n \tau}{\mu_0 t_m} \quad @Linear-change \quad (5-1)$$

$$Q_{cl} = \left( \frac{B_m^2}{2\mu_0} \right) \frac{2n\tau}{t_d + n\tau} \quad @Exponential decay \quad (5-2)$$

$$Q_{hy} = \frac{2}{3\pi} \int_{B_{min}}^{B_{max}} J_c(B) dB \quad (6)$$

여기서,  $n\tau$ 은 결합시정수,  $t_m$ 은 전류 충전 시간이다.

퀘칭은 PF2 코일의 8개의 헬륨채널 중 하나의 채널에서 거의 중간 지점인 32 m 부분에서 대략 1 m에서 국부적으로 외부교란에너지를 인가함으로 수행하였다. 인가되는 외부 교란에너지는 운전 전류 20.83 kA에서 t=12초에 20 ms동안 1 kW/m의 에너지를 인가하였다. 그림 4와 그림5는 각각 t=15초와 t=16초에 PF 2 코일의 에너지의 방전을 시작하였을 때의 전류, 저항성 전압 및 저항, 그리고 퀘칭 초기 지점에서의 온도 및 헬륨 채널 출구에서의 온도변화를 보여주고 있다. 교란 에너지 인하 후, 대략 t=12.5초부터 전압이 측정되었다. t=15초에서 전류 고속 방전을 수행하였을 경우에는 대략 t=20초에 퀘칭 초기 발생시점의 온도가 96K 까지 상승한 후, 감소하였으며, t=16초에 방전을 한 경우, 온도가 144 K까지 상승한 후, 감소하고 있다. 반면 헬륨채널의 출구부분의 온도 변화는 크지 않음을 알 수 있으며, 퀘칭 검출에 이용하기는 그 유용성이 매우 낮음을 알 수 있다. 앞의 "Hot spot" 분석에서 계산된 최대온도는  $t_{qpd}=2.5s$  지연에 110K, 3.5초 지연에 160K 으로 Gandalf 코드에 의한 해석결과가 다소 낮은 것은 단열조건을 가정한 "Hot-spot"분석에 비해 코

드해석은 헬륨 및 도체로의 열전달이 적용됨에 기인한다. 따라서 퀘칭에 따른 최대온도상승의 해석결과가 신뢰할 수준으로 판단된다. 시뮬레이션 결과로 판단한다면 퀘칭 전압 검출시 퀘칭 문턱값을 100 mV로 적용한다면 퀘칭 유지 시간을 대략 2s 까지, 그리고 200 mV의 퀘칭 전압 문턱값을 적용한다면 퀘칭 유지 시간을 대략 1s 로 설정하면 된다.

### 2.2. 전류 변화 단계에서의 PF 코일 퀘칭 해석

PF 코일의 퀘칭 검출은 퀘칭 전압 검출기에서 충분히 유도성 전압을 제거한다 하더라도 PF 코일의 빠른 전류 변화에 의해 많은 노이즈에 의해 어려울 수 있다. 따라서 그림2의 PF 전류 인가 시나리오에서 t=14s 부터 SoF가 시작되는 t=19.56 기간 동안 퀘칭 검출이 불가능함으로 인해 퀘칭 검출기의 동작을 일시 정지할 가능성도 있다. 이 경우 최악의 시나리오는 퀘칭 검출기의 동작을 멈추는 시점인 t=14s 에 퀘칭이 발생하여 퀘칭 검출기가 재가동되는 시점인 t=19.56 이후 일정시간 경과 후 M.I.I.Ts 분석을 수행하였으며, 그 결과는 표3과 같다. 최대 M.I.I.Ts 값의 PF1 코일에서 발생하며 t=22.56초에 코일 에너지가 고속 방전되었을 경우, Hot spot 분석에 의하면 대략 120K 까지의 온도상승이 예상된다. 전류의 급속한 변화에 따른 AC 손실이 더해져 온도상승이 증가할 것으로 예상되나 그 증가분은 퀘칭에 의한 증가분에 비해 매우 낮은 값을 보여줄 것으로 판단된다. 결론적으로 매우 높은 전류변화를 보여주는 SoP부터 SoF 까지의 기간 동안은 퀘칭 검출기의 인터록발생을 중단하고, 그 이후 재가동일 시키는 방식도 고려될 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. M.I.I.Ts of each PF coil when a quench protection delay was set 1 s, 2 s, and 3 s starting from SoF after a quench occurs at t=14s.

Dump Start	t=20.56s [ $\times 10^9 A^2 s$ ]	t=21.56s [ $\times 10^9 A^2 s$ ]	t=22.56s [ $\times 10^9 A^2 s$ ]
PF1	1.4271	1.6636	1.9038
PF2	0.4503	0.4733	0.4990
PF3	0.1351	0.1352	0.1356
PF4	0.2290	0.2293	0.2293
PF5	0.9122	0.9658	1.0163
PF6	0.1688	0.1999	0.2300
PF7	0.8104	0.9848	1.1627

### 3. KSTAR PF Coil 퀘칭 전압 검출 시스템 운전 특성

KSTAR PF 코일의 퀘칭 검출은 펄스전류 운전으로 인해 발생하는 유도성 전압 강하는 퀘칭에 의한 저항성 전압강하와의 구분이 매우 어려워진다. 이를 위해 우선적으로 퀘칭 전압을 검출하는 전압센서부에서 유도성 전압을 가능한 최소화하여야 한다.

운전과정에서 발생하는 유도성 전압의 제거를 위해 KSTAR PF1-5 코일은 크게 3가지의 방식이 사용되었다. 첫 번째 방식은 그림 6에서 보이는 방식처럼 전압 센서 자체가 코일과 동일하게 감겨진 CVTS(Co-wound Voltage Tap Sensor)를 사용하는 것이다. CVTS에 의해 측정되는 전압은 코일의 유도전압과 반대의 극성

의 유도전압을 발생시켜 최종적인 측정 전압에서 유도성 전압 성분이 많은 부분 상쇄되게 된다. 그러나 코일과 CVTS의 형상이 완전히 일치하지 않기 때문에 어느 정도의 유도성 전압이 필연적으로 측정된다. 이 CVTS에서 측정되는 유도성 전압은 코일의 전류 변화가 클수록 크게 된다. 두 번째 방식은 각 PF 코일은 Upper와 Lower 코일로 구성되어 있으며, equatorial plane을 기준으로 대칭이며, 전기적으로 직렬 연결되어 있다. 즉 펄스 전류 운전 때 Upper 코일의 CVTS 측정 유도전압과 Lower 코일에서의 CVTS 측정 유도전압은 거의 같게 되며, 이 두 신호를 연산한 신호는 유도전압 성분만을 다시 한 번 제거할 수 있게 된다. 세 번째는 일반적으로 사용되는 브리지 회로를 사용하여 퀘치를 검출하는 것이다. 그러나 브리지 회로는 multiple magnet system에서는 그 자체로는 유도전압의 제거 효과가 없기 때문에 그림 7에서 보여 지듯이 두 번째 방식과 동일하게 Upper 코일의 Balance circuit의 출력 전압과 Lower 코일의 Balance circuit의 출력전압을 연산한 신호를 퀘치 검출 신호로 사용할 수 있다. 이상의 세 가지 방법 이외에 전류 인가에 따라 코일의 초임계 헬륨 출구의 온도의 상승분을 측정하여 상승분이 일정 값을 넘게 되는지를 통해 퀘치를 검출하는 방식이 사용된다. PF6-7 코일의 경우는 CVTS가 설치되어 있지 않기 때문에 위의 세 번째 방법인 Balance circuit에 의한 방법과 온도측정방식을 사용하여 퀘치를 검출한다. 온도측정에 의한 퀘치 검출 방식은 그 응답시간이 느리기 때문에 차선의 방법으로만 이용이 가능하다. 결국 퀘치 검출은 실시간으로 퀘치를 측정할 수 있는 전압측정 방식이 최우선 방식이 된다.

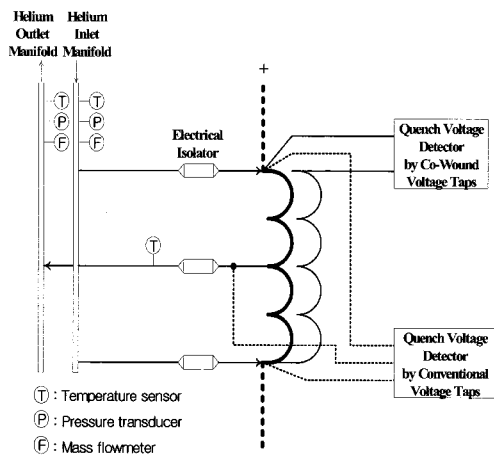


Fig. 6. Schematics of PF1-5 coils' quench detectors.

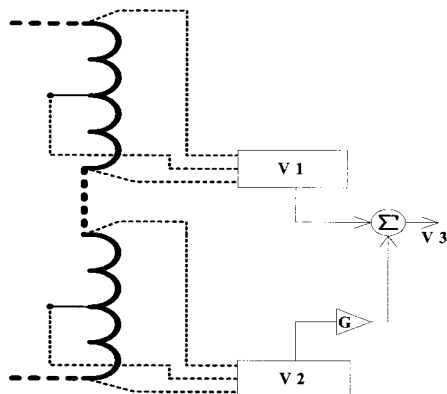


Fig. 7. Schematics of PF6-7 coils' quench detectors.

KSTAR 장치의 최초 플라즈마 달성을 목표로 2008년 4월초부터 7월말까지 장치의 최초 시운전이 수행되었으며, 이 과정에서 PF 코일용 퀘치 검출기의 유도전압측정 특성을 분석하였다 [2]. KSTAR 최초 플라즈마 목표는 내부 전력 수급 및 플라즈마 가열/진단 장치의 현황에 맞추어 100 kA, 1초 유지로 설정되었다. 이에 따른 PF 코일의 운전 전류의 전형적인 파형 및 PF1-5 코일의 CVTS 측정 전압 파형은 그림8과 같다. IM 단계에 이르기 위한 전류의 변화율은 모든 코일에서 1 kA/s이다. 모든 PF코일의 퀘치 전압을 검출하기 위한 퀘치 전압 문턱값 및 퀘치 유지 시간은 각각 200 mV와 1s로 설정하였다. 그림 8에서 보이듯이 전류의 충전이 시작되는 시점에 매우 큰 유도 전압은 KSTAR PF 코일용 도체인 CICC (Cable-In-Conduit Conductor)의 Jacket 재료가 강자성체인 Incoloy908에 의한 자화로 기인한 것이며, 일정전류 이상에서 Incoloy908이 자기 포화가 되면 이러한 노이즈 전압은 사라지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1 kA이하의 전류에서는 PF 코일의 퀘치 검출기의 작동을 중지하여 운전하였다. 그림 8에서 보듯이 1 kA/s의 전류변화에 따라 PF1-5 CVTS에서 측정되는 전압의 크기는 최대값은 PF1 CVTS에서의 대략 150 mV 이었다. 그림 9는 PF 코일의 운전시 PF7 코일에 퀘치 검출을 위해 사용되는 Bridge 회로의 응답특성이다. 개별 코일에 부착된 회로의 출력은 유도성 전압성분에 의해 전류 변화시 사용이 불가능하며, 그림 7의 방법을 적용하여 운전하면 거의 대부분의 유도전압 성분이 제거된 신호를 얻을 수 있기 때문에 그 신호를 퀘치 검출에 이용할 수 있었다.

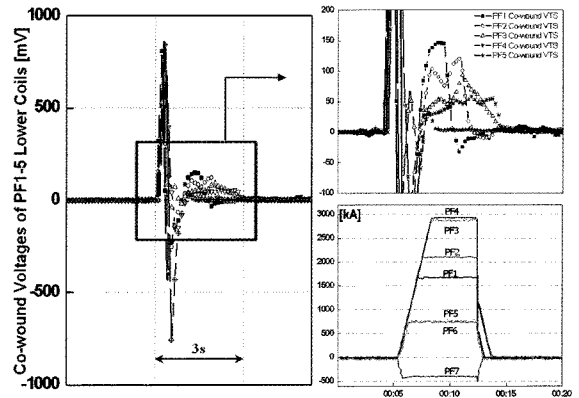


Fig. 8. The voltage response of the co-wound voltage sensor for PF1-5 coils.

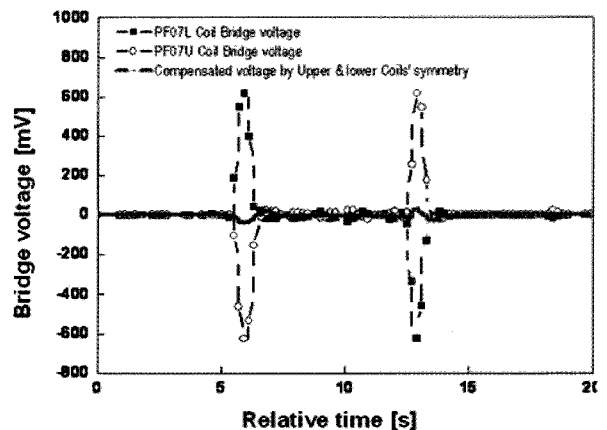


Fig. 9. The voltage response of the compensated voltages for PF 7 coil.

#### 4. 결 론

KSTAR PF 초전도 코일의 퀠치 검출기가 설계, 제작되어 2008년 1차 KSTAR 시운전에서 성공적으로 운전되었다. PF 코일의 퀠치를 검출하기 위해 PF1-5 코일에 CVTS가 설치되어 하드웨어적인 방식으로 코일의 유도전압을 최소화시켰으며, 또한 발생 유도전압의 실측치, 퀠치 해석에 의한 퀠치 전압 문턱값 및 퀠치 유지 시간 등이 설정되어 PF 퀠치 전압 검출의 운전이 이용되었다. 본 논문에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 퀠치 분석을 통해 PF 코일의 퀠치 전압 문턱값은 200 mV, 퀠치 유지 시간을 3초로 설정하면 퀠치(온도 상승)에 의한 PF 초전도 코일의 성능저하를 막을 수 있으며, 최초 시운전에서 이를 적용하여 KSTAR PF 코일의 퀠치 검출을 수행하였다.
- (2) 저전류(1 kA) 이하에서는 CICC의 재킷인 강자성체인 Incoloy908에 의한 높은 자기전압의 발생으로 PF 코일 퀠치 검출기의 동작 중지하여야 한다.
- (3) SoP 단계부터 SoF 단계까지는 KSTAR 장치에 플라즈마를 생성시키기 위해 PF 코일의 매우 높은 전류 변화율을 요구하고 있기 때문에 추후 이 과정에서 유도성 전압에 의해 퀠치 전압 검출기가 오동작할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이 기간 동안 퀠치 검출기의 작동을 중지하고 그 이후 재가동하는 방법의 타당성을 분석하였으며, 그 결과 이 기간 동안 퀠치 검출을 중지하여도 퀠치에 의한 온도상승을 충분히 억제할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육·과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. S. Bak, C. H. Choi, H. L. Yang, J. W. Sa, H. K. Kim, B. C. Kim, N. I. Her, K. Kim, Y. S. Kim, W. C. Kim, Y. M. Park, Y. K. Oh, M. Kwon, G. S. Lee, "Key features and engineering progress of the KSTAR tokamak", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 32, No 2, pp. 757, 2004.
- [2] Y. Chu, H. Yonekawa, Y. O. Kim, K. R. Park, Hyun Jung Lee, M. K. Park, Y. M. Park, S. J. Lee, T. H. Ha, Y. K. Oh, J. S. Bak, "Quench detection based on voltage measurement for the KSTAR superconducting coils", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1565-1568, 2009.
- [3] Y. Chu, Y. O. Kim, H. Yonekawa, M. K. Park, K. R. Park, Y. K. Oh, J. S. Bak, "Quench detection system for the KSTAR superconducting toroidal field coil", Journal of the Korea Physical Society, Vol. 52, pp. 568-575, March 2008.
- [4] Kiyoshi Yoshida, Hiroyuki Takigami, Hirotsu Kubo, "Analytical studies on the hot spot temperature of cable-in-conduit conductors", Cryogenics, Vol. 41, pp. 583-594, 2001.
- [5] K. R. Park, Y. Chu, H. Yonekawa, E. N. Baang,

Y. O. Kim, H. J. Lee, Y. M. Park, Y. J. Lee, H. S. Chang, D. K. Lee, J. H. Choi, S. H. Park, S. H. Hahn, K. H. Kim, I. S. Hwang, M. K. Park, K. W. Cho, Y. S. Kim, Y. K. Oh, J. S. Bak, "Qualification test result of the KSTAR superconducting coils from the construction to the commissioning steps", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1561-1564, 2009.

[6] S. Lee, Y. Chu, W. H. Chung, S. J. Lee, S. M. Choi, S. H. Park, H. Yonekawa, S. H. Baek, J. S. Kim, K.W. Cho, K. R. Park, B. S. Lim, Y. K. Oh, K. Kim, J. S. Bak, "AC loss characteristics of the KSTAR CSMC estimated by pulse test," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no. 2, pp. 771-774, 2006.

#### 저 자 소 개



**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 요코하마국립대 대학원 전자정보공학전공(공학박사), 2000년-2002년 삼성종합기술원, 2003년-현재 국가핵융합연구소 연구원.



**이현정(李炫政)**  
1974년 11월 20일생, 1997년 대구대 물리학과 졸업, 2003년 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운전연구팀 선임 연구원.



**김영옥(金榮沃)**  
1975년 6월 8일생, 2002년 한국기술교육대학교 공대 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 국가핵융합연구소 장치운전팀 선임기술원.



**박갑래(金榮沃)**  
2004년 한밭대학교 전기공학과 공학석사, 현재 국가핵융합연구소 책임기술원 및 KSTAR 장치운전팀장.



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