

## KSTAR PF 초전도자석의 크기 및 재료에 따른 결합손실 특성 분석

## Analysis of Coupling Loss with Size and Material in the KSTAR PF Superconducting Coils

이현정<sup>1,\*</sup>, 추 용<sup>1</sup>, 이상일<sup>1</sup>, 박영민<sup>2</sup>, 박현택<sup>2</sup>, 오영국<sup>2</sup>H. J. Lee<sup>1,\*</sup>, Y. Chu<sup>1</sup>, S. Lee<sup>1</sup>, Y. M. Park<sup>2</sup>, H. T. Park<sup>2</sup>, Y. K. Oh<sup>2</sup>

**Abstract:** It is important to predict AC loss in Nb<sub>3</sub>Sn and NbTi cable-in-conduit-conductor (CICC) reliably for the design and operation of large superconducting coils. The hysteresis loss in the superconducting filaments and coupling loss within strands and among strands in a cable or composite are dominant ac losses in superconducting magnets. The coupling loss in a superconductor can be characterized by identifying the coupling constant time  $n\tau$ . To reduce the coupling loss, all the strands (superconductor and Cu) in KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advance Research) are chromium plated with thickness of  $1\pm 0.5\mu\text{m}$ . The ac losses of PF1, PF5 and PF6 coils has been measured by calorimetric method while applying trapezoidal current pulses with various ramp rate from 0.5 kA/s to 2 kA/s. The coupling time constants for Nb<sub>3</sub>Sn coils are 25~55 ms and the values are not co-related with the coil size, the time constants for NbTi coil is 30 ms.

**Key Words:** KSTAR, AC loss, coupling time constant, trapezoidal pulse, Nb<sub>3</sub>Sn, NbTi.

## 1. 서 론

Korea Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR)는 토카막 형태의 핵융합 실험 장치로써 두 종류의 초전도 선재를 사용하여 모든 코일이 제작되었다. 고온의 플라즈마를 발생시키고 구속하기 위하여 높은 자기장을 필요로 하는 PF(Poroidal Field)1~PF4와 TF(Toroidal Field)코일 그리고 플라즈마를 조절하기 위한 코일 중 PF5는 임계자기장과 임계 온도가 높은 Nb<sub>3</sub>Sn 선재를 사용하였고, 상대적으로 자기장의 세기가 낮은 PF6와 PF7은 NbTi 선재를 사용하여 고성능 플라즈마의 장시간 운전이 가능하도록 제작되었다.

초전도체는 임계온도 이하에서 DC 저항은 없지만 시간에 따른 자기장의 변화에 의해 교류 손실(AC loss)이 발생하여 초전도 성질을 유지 할 수 있게 만드

는 냉매의 온도를 상승시켜 장시간 초전도 자석의 운전 안정성에 영향을 미치게 된다. 교류 손실에는 자기 이력 손실(Hysteresis Loss), 결합 손실(Coupling Loss), 맴돌이 전류 손실(Eddy current Loss)로 나눌 수 있다. 맴돌이 전류 손실은 초전도 케이블을 싸고 있는 재킷에서 주로 발생되기 때문에 자기이력 손실과 결합손실에 비해 작으며, 자기장의 변화율에 비례하고, 초전도 선재의 유효 필라멘트 지름, 자기장의 크기 등에 의해 결정되는 자기이력손실은 유효 필라멘트의 지름을 작게 하여 손실을 줄이는 방법이 지속적으로 연구되고 있다[1-3]. 초전도 필라멘트 간 저항, 케이블 피치, 자기저항, 선재 간 접촉 저항 등에 의해 결정되는 결합손실은 시간에 따른 자기장 변화의 제곱에 비례하기 때문에 교류운전 중 가장 큰 손실을 발생하기 때문에 특히 토카막과 같은 대형 초전도 자석에서 교류운전을 하는 PF 코일은 초전도 선재의 크기나 케이블 피치 및 선재 간 접촉 저항을 높여 결합손실을 줄이는 시도가 지속적으로 이루어지고 있다[4]. KSTAR에 사용된 모든 선재에 시행된 크롬도금은 선재 간 교차 저항을 증가 시켜 결합 손실을 줄이기 위한 시도였다.

Table 1. Major Parameters of the KSTAR PF coils.

Strand	PF1	PF5	PF6
Superconductor	Nb <sub>3</sub> Sn	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi
Strand diameter [mm]	0.78 ± 0.001		
Cu/non-Cu ratio	1.5±0.15	1.5±0.15	2.8±0.28
Jc(4.25 K, 12 T) [A/mm <sup>2</sup> ]	730	730	2700
Hysteresis loss (±3 T, 4.2 K) [mJ/cc]	250	250	200
n-value	> 20	> 20	> 25
RRR	100		
<b>Conductor</b>			
conduit material	Incoloy 908	Incoloy 908	STS 316LN
Void Fraction(measured)	37.5 (32.6) %		
Number of strands	360 (SC 240, Cu 120)		
Cabling pattern	3×4×5×6		
Cable twist pitch	40±1, 80±2,	125±2,	237±3
<b>Coil</b>			
Number of turn per coil	9×20	13×16	8×16
CICC length per coil	652	1,404	2,487

<sup>1</sup>정 회 원 : 국가핵융합연구소<sup>2</sup>비 회 원 : 국가핵융합연구소

\*교신저자 : yaeban@nfri.re.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 08월 21일

게재확정 : 2009년 08월 27일

2006년 KSTAR의 CS(Central Solenoid)모델 코일에 삼각과와 DC 옵셋 사인파를 인가하여, Nb<sub>3</sub>Sn 코일의 결합손실을 측정하였으며, KSTAR 설계 값인 60 ms 이하인 것을 검증하였다[5]. 코일의 설계에 관계하는 결합손실은 코일의 크기와 재료에 무관하지만, KSTAR에 사용된 Nb<sub>3</sub>Sn 코일의 경우 코일형태를 만든 후 마

지막 열처리 과정에서 선재 간 접촉저항이 감소하기 때문에 열처리 과정을 거치지 않은 NbTi 코일과 다를 수 있다. 표 1은 KSTAR PF1, PF5, PF6 코일의 주요 디자인 값을 나타내고 있으며, 모든 코일의 조립이 끝난 시점에서 코일의 크기와 코일에 사용된 초전도 선재의 종류에 따른 결합시정수의 차이를 사다리꼴 파형을 인가하여 열량법으로 비교해 보고자 한다.

## 2. 실험 및 측정 방법

### 2.1. 교류손실 측정 방법

KSTAR의 PF 코일의 냉각 시스템은 PF1~4번 코일은 그림 1의 왼쪽에 보는 바와 같이 코일 안쪽에 헬륨 냉각 라인이 있으며, PF 5~7번 코일은 오른쪽에 보는바와 같이 코일의 바깥쪽에 헬륨 라인이 설치되어 있다. 이러한 헬륨 라인 구조는 그림 2에서 보는 바와 같이 냉각채널 길이에 따른 자기장의 분포도가 1~4번까지는 액체헬륨입구와 출구에서 자기장의 크기가 가장 크고 가운데 부분의 자기장 세기가 가장 작게 나타나며, PF 5~7번 코일은 가운데 부분의 자기장의 크기가 가장 크고 액체헬륨입구와 출구에서 자기장의 크기가 작게 나타난다.

모든 코일은 turn과 layer로 이루어져 있으며, PF1은 9 개의 turn과 20개의 layer, PF5는 13개의 turn과 16 개의 layer, PF6는 8개의 turn과 16개의 layer로 이루어져 있다. 각 코일은 2 layer에 걸쳐 하나의 냉각 채널을 이루고 있기 때문에 PF1은 10개 PF5, PF6는 각각 8개의 냉각 채널을 가지고 있으며, 그림2에서 보는 바와 같이 한 turn 동안은 자기장의 세기가 일정하기 때문에 냉각 채널당 PF1은 냉각 채널당 18번과 26번의 균일한 부분이 나타나며 PF6 또한 16번의 균일한 부분이 나타난다.

그림 3 에서와 같이 모든 코일에 동시에 전류를 인가하게 되면 각 코일에서 발생하는 교류손실에 의해 헬륨의 온도가 올라가게 되며, 그림 3은 출구 쪽으로 빠져 나온 헬륨의 온도를 시간에 따라 측정 한 것이다.

교류 손실에 의해 데워진 헬륨온도의 특성은 냉각라

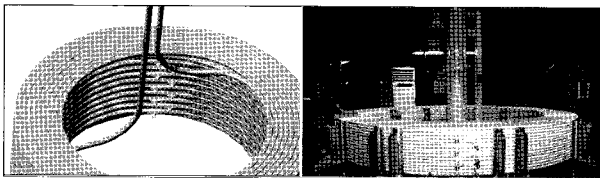


Fig. 1. Helium stub line of the PF1 coil inside (left) and of the PF5 coil outside (right).

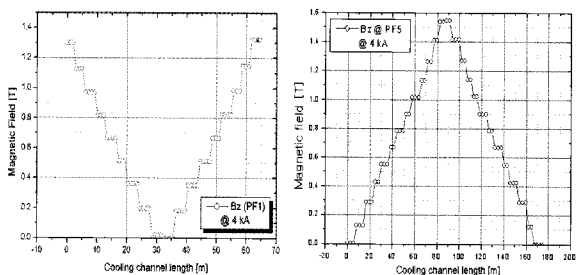


Fig. 2. The maximum magnetic field profile of the PF1(left) and PF5(right) along cooling channel length @ 4kA.

인의 자기장 분포 특성을 따라가기 때문에 동일한 형태로 냉각라인이 설치 되어있는 PF1~PF4의 시간에 따른 헬륨의 온도는 비슷한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. PF1~PF4의 첫 번째 봉우리는 그림 2의 왼쪽 그림에서 보는 바와 같이 자기장의 변화가 큰 출구 부분에서 발생한 교류 손실에 의해 데워진 헬륨이 먼저 빠져 나와서 보이는 것이며, 두 번째 보이는 봉우리는 액체헬륨 입구부분에서 생긴 교류손실에 의해 데워진 헬륨이 냉각 채널을 통과해서 나오면서 보이는 것이다.

표 2는 냉각 PF1, PF5, PF6의 냉각 채널의 길이 및 헬륨이 냉각 채널을 빠져 나오는데 걸리는 시간을 표시한 것으로 PF1~PF4의 냉각채널 길이는 64.5 m로 입구에서 헬륨이 빠져 나오는데 걸리는 시간은 5분내이다. 따라서 전류의 충방전 동안 헬륨의 입구와 출구 부분에서 생긴 교류 손실은 동일하지만 냉각 채널을 빠져 나오는 동안 냉각 채널 간 열전도에 의해 두 번째 봉우리가 첫 번째 봉우리에 비해 온도가 낮게 측정된다.

Table 2. Cooling Channel Parameters of Coils.

Coil #	CH	length/CH [m]	mdot/CH [g/s]	Velocity [m/s]	Elapsed time (Cal) [sec]
PF1	10	64.5	3.45	0.22	285.7
PF5	8	175.3	2.31	0.15	1138.7
PF6	8	310.6	2.40	0.15	1990.3

PF5~PF7 역시 냉각 라인이 같이 형태로 설치되어 있기 때문에 시간에 따른 헬륨의 온도는 동일 양상을 보이며, PF6와 PF7은 냉각 라인의 길이가 310.6 m, 281.2 m로 다른 코일보다 상대적으로 길고, 2 kA의 낮은 전류인가로 인하여 교류 손실로 인한 헬륨의 온도 변화를 뚜렷하게 보기 어렵다. PF5는 헬륨의 온도 변화가 가장 높은 부분이 코일의 중앙부분으로 중간에서 출구까지의 거리는 87.7 m이고 헬륨이 빠져 나오는데 소요되는 시간은 10분이다. 따라서 64.5 m의 짧은 냉각 라인을 가진 PF1~PF4에 비해 헬륨의 온도 변화가 작게 나타나는 것이다.

운전 중 코일의 온도를 예측하기 위해서 교류손실 측정은 안정적인 운전을 위한 가장 중요한 작업 중 하나이다. 교류 손실 측정을 위해서 그림 4에 나타나 있듯이 세가지 종류의 전류 상승(하강)속도를 갖는 사다리꼴 파형을 인가한 후 헬륨의 온도의 변화를 측정하였다. 상승 후 얼마간 머무는 최대전류 값은 PF1 코일의 경우 4 kA로 하였고 PF5와 PF6 코일은 2 kA로 하였다.

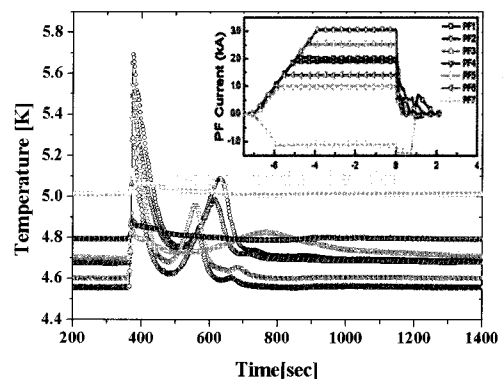


Fig. 3. Traditional temperature overshoot by PF coil current pulse (inset ; PF coils current wave form).

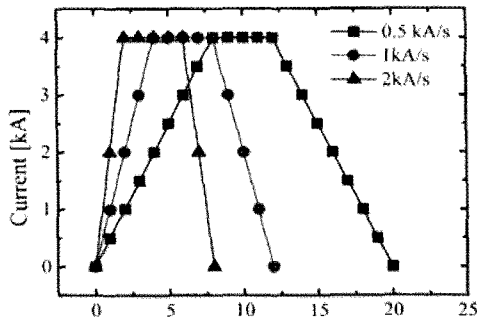


Fig. 4. Trapezoidal current waveform of PF1 coil (@ 4k : 0.5 kA/s, 1kA/s, 2kA/s).

그림 5에서 보듯이 PF1은 10 개의 냉각 채널과 출구 부분에 6개의 온도 센서가 부착되어 있으며, CH1(1번 채널)과 CH6은 조인트가 부착되어 있다. 조인트는 버스 라인에 연결된 냉각 라인과 연결되어 있기 때문에 코일과 조인트의 교류손실이 동시에 발생되고 열교환 후 헬륨의 온도를 측정하기 때문에 코일자체의 교류손실을 분석하기에 부적합하다. 그리고 CH2, CH3는 자기장의 세기가 작기 때문에 자기이력손실의 영향을 크게 받는다. 따라서 자기장의 세기가 가장 큰 CH5의 헬륨 온도를 이용하여 교류 손실을 분석하였다. PF6번은 코일 중앙에서 자기장의 세기가 가장 강하지만 CH3, CH4 간에 조인트가 존재하여 CH5의 헬륨 온도를 분석하였으며, PF5는 자기장이 세기가 가장 강한 CH3의 헬륨의 온도를 이용하여 각각의 교류손실을 측정하였다.

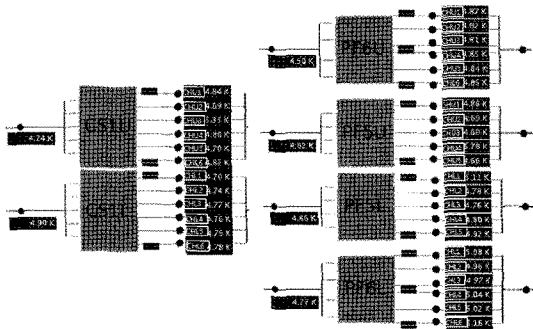


Fig. 5. Cryogenic circuit of PF1, PF5, PF6 UL coil.

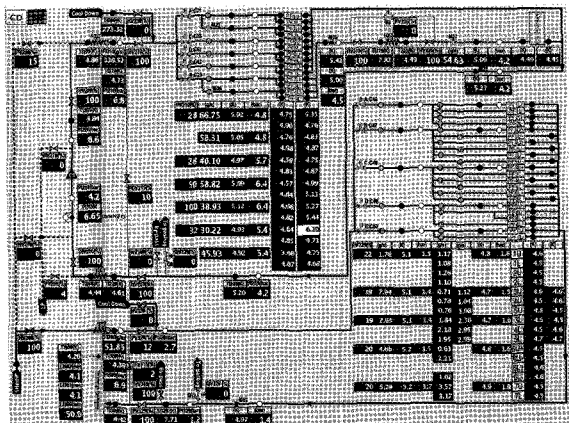


Fig. 6. Screen shot of the helium distribution system control.

열량 분석에 필요한 헬륨의 유량, 압력, 온도 등은 그림 6에서 보는 바와 같이 초전도 코일과 버스라인의 헬륨 공급을 위해 설치된 헬륨 분배 시스템에서 측정된 값을 이용하였다.

### 3. 결과 분석

KSTAR 초전도 코일은 다중선재방식으로 설계되었으며, 교류운전 중 발생하는 손실을 최소화하기 위하여 최적의 케이블링 피치와 모든 선재에 크롬으로도 급되어 있다. 교류손실로 발생된 에너지는 모두 초전도자석의 열부하로 작용되며, 이 논문에서는 PF1, PF5, PF6의 교류손실을 측정하여 자기이력 손실과 결합 손실을 계산하였다.

#### 3.1. 자기이력 손실

초전도체에 시간에 따라 변하는 자기장을 인가하게 되면, 초전도 선재에 침투된 자기장은 전류변화에 의해 열을 발생 시키게 된다. 다음은 사다리꼴 형태의 전류를 초전도 선재에 인가하였을 때 발생하는 자기이력 손실을 나타낸 것이다.

$$Q_H \approx \frac{4}{3\pi} D_{eff} \int_{B_{min}}^{B_{max}} J_{C,SC}(B) dBA_{st} \quad [J/m] \quad (1)$$

여기에서  $D_{eff}$ 는 선재의 유효지름,  $J_{C,SC}(B)$ 는 자기장에 따른 선재의 임계전류,  $A_{st}$ 는 선재의 면적이다. 그림 7은 식(1)을 이용하여  $Nb_3Sn$ 과  $NbTi$ 의 자기이력 손실 값을 계산한 것으로 선재에 균일한 자기장이 인가되었을 때 발생하는 열량을 나타낸 것이다. 하지만 실제 코일에서는 운전 중 냉각 채널 하나당 자기장의 분포는 그림 2에서 나타나 있는 바와 같이 길이에 따라 다른 값을 가지기 때문에 자기이력 손실을 예측하는데 어려움을 가지고 있다.

따라서 같은 크기의 전류를 코일에 인가하게 되면 한 주기 동안 발생한 자기이력손실은 변화가 없기 때문에 운전 중 발생된 총열량에서 자기이력 손실을 분리하기 위하여 그림 8에 보는 바와 같이 전류값을 고정시키고 상승률을 다르게 하면 y축 절편에 해당하는 값이 자기이력 손실에 해당한다. 이렇게 구한 PF1, PF5, PF6의 자기이력 손실은 446 J, 365 J, 31 J이며, 이때 최대 자기장은 각각 약 1.3 T, 0.5 T, 0.4 T이다. 코일의 자기장 값이 서로 다르기 때문에 자기이력 손

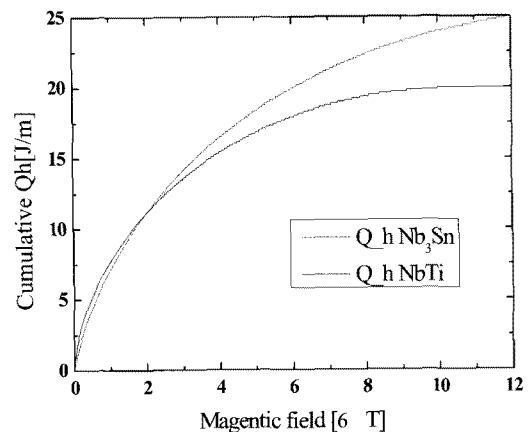


Fig. 7. Hysteresis loss of  $Nb_3Sn$  and  $NbTi$  strand.

실 값에 차이를 보이며, PF6의 총 열량이 작게 측정된 이유는 PF6의 냉각 채널 길이가 표 2에서 보는 바와 같이 310.6 m에 해당하고 냉각채널의 입구에서 출구까지 빠져 나오는데 2000초가 걸리기 때문에 냉각 채널 가운데에서 데워진 헬륨이 빠져 나오기 위해서는 1000초 이상이 소요된다. 따라서 냉각 채널 간 열전도에 의해 헬륨의 온도가 낮아져 실제 발생한 교류 손실보다 낮게 측정된다.

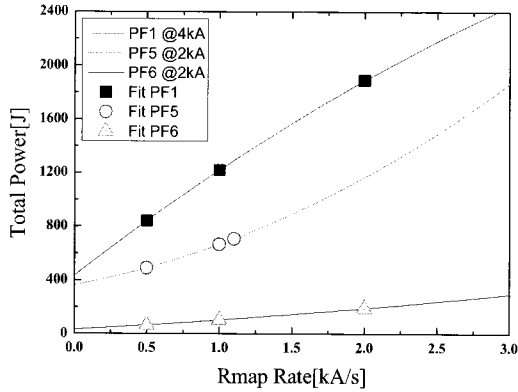


Fig. 8. Total power of PF1, PF5, PF6 as difference ramp rate after trapezoidal pulse (dot lines are the measurement data and the solid lines are the extrapolation).

3.2. 결합손실

식(2)와 같이 코일에서 발생한 교류손실은 결합 손실을 포함한 다양한 손실들을 모두 포함하고 있다. 따라서 서로 다른 상승률에서 발생한 총 손실의 차를 이용하면 결합손실의 차로써 나타 낼 수 있다.

$$Q_{tot1} = Q_m + Q_{cp1} + Q_{eddy1} + Q_{etc1}$$

$$Q_{tot2} = Q_m + Q_{cp2} + Q_{eddy2} + Q_{etc2}$$

$$Q_{eddy}, Q_{etc} \ll Q_{hys}, Q_{cp} \text{ and } Q_{hys} = \text{constant} \quad (2)$$

$$\Delta Q = Q_{tot1} - Q_{tot2} \approx Q_{cp1} - Q_{cp2}$$

사다리꼴 형태의 결합 손실은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$Q_{cp} = \frac{2B_m^2 n\tau}{\mu_0 t_m} A_{st} [J/m] \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\mu_0 L_p^2}{8\pi^2 \rho_{\perp}}$$

여기에서,  $B_m$ 은 최대 자기장,  $n\tau$ 는 결합 시정수,  $\mu_0$ 는 진공에서 투자율,  $t_m$ 은 최대 전류까지 올리는데 걸린 시간,  $L_p$ 는 twist pitch,  $\rho_{\perp}$ 는 선재 간 접촉저항을 나타낸다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 결합 손실에서 선재의 단면적, 인가 전류 형태, 최대 자기장은 정해져 있는 값이지만,  $n\tau$ 는 선재들 간의 수직 저항과 트위스트 피치에 의해 결정된다. 수직 저항은 코일 제작 시 선재의 표면 처리, 케이블링 및 annealing 방법에 따라 변하기 때문에  $n\tau$ 의 예측은 코일의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다.

따라서 두 가지 방법을 통하여  $n\tau$ 를 계산하였다. 첫

번째 방법은 표 3에 나와 있는 것과 같이 총 교류손실에서 앞 절에서 구한 자기이력 손실을 뺀 나머지 값을 결합손실로 취급하여  $n\tau$ 를 계산하는 것이다. 결합손실에 맴돌이 전류에 의한 손실이 모두 포함되어 있기 때문에 실제  $n\tau$ 보다는 높게 계산된다. 따라서 PF1은 평균 59.1 ms PF5는 25.25 ms, PF6는 30.3 ms의 결합 시정수 값이 계산 되었다. PF1은 PF5와 PF6에 비해 높게 계산되었는데 이것은  $Nb_3Sn$ 은 코일 성형 후 열처리 과정을 거치기 때문에 선재 간 접촉 저항이 감소할 뿐만 아니라 다른 코일에 비해 짧은 냉각 채널로 인하여 열손실이 작기 때문에 결과적으로  $n\tau$ 는 크게 나타난다.

Table 3. Calculation of the coupling time constant I.

# shot	ramp rate [kA/s]	$Q_{total}$ [J]	$Q_{hys}$ (Fit) [J]	$Q_{cp}$ [J]	$n\tau$ [ms]
PF1					
1183	0.5	840	446	394	61.3
1184	1	1218	446	772	60.0
1185	2	1888	446	1442	56.1
PF5					
1171	0.5	490	365	125	22
1172	1	665	365	300	27
1173	1.1	706	365	321	26.7
PF6					
1163	0.5	65	31	34	28
1164	1	103	31	72	30
1165	2	191	31	160	33

두 번째 방법은 식(2)를 이용하여 같은 전류값을 각 코일에 인가 할 때 자기이력손실은 ramp rate에 영향을 받지 않기 때문에 서로 다른 ramp rate을 가지는 전류 파형을 선택하여 교류 손실의 차이를 구하면 ramp rate 차이에 의한 결합 상수만을 분리 할 수 있다. 이 값을 식 (3)에 적용하면 PF1은 55.1 ms, PF5는 31.3 ms, PF6는 34.3 ms의 결합시정수 값을 얻을 수 있었으며, PF6의 결합 시정수가 첫 번째 방법으로 계산한 것과 동일하게  $Nb_3Sn$ 에 비해 낮게 계산된 것을 알 수 있었으며, PF1 역시 비슷한 값을 얻을 수 있었으나 PF5는 두 번째 방법에서 상당히 큰 시정수 값이 계산 되었다.

Table 4. Calculation of the coupling time constant II.

Differential Ramp rate	$Q_{del}$ [J]	$n\tau$ [ms]
PF1		
2kA-1kA	669.3	52.0
2kA-0.5kA	1048	54.3
1kA-0.5kA	378	58.9
PF5		
1.1kA-1kA	41	32.5
1.1kA-0.5kA	216	31
1kA-0.5kA	175	30.5
PF6		
2kA-1kA	88	36.5
2kA-0.5kA	126	35.0
1kA-0.5kA	38	31.5

4. 결 론

KSTAR PF (Poloidal Field) 초전도 코일 중에서  $Nb_3Sn$  으로 제작된 PF1, PF5 코일과  $NbTi$ 로 제작된 PF6 코일의 교류손실 특성을 구하기 위하여 세 가지

종류의 전류상승률(0.5, 1, 2 kA/s)을 가진 사다리꼴 파형을 인가시켜 발생되는 열을 측정하였다. PF1, PF5, PF6의 자기이력손실은 각각 446 J, 365 J, 31 J으로 측정되었으며, 결합 손실을 구하기 위하여 첫 번째 방법으로 구한 결합 시정수는 PF1은 59.1 ms, PF5는 25.3 ms, 그리고 PF6는 30.3 ms이었으며, 두 번째 방법으로 구한 결합시정수는 각각 55.1 ms, 31.3 ms, 34.3 ms로 계산되었다. Nb<sub>3</sub>Sn 으로 제작된 코일은 코일의 크기와 무관하게 25~55 ms의 결합시정수 값을 얻을 수 있었으며, NbTi으로 제작된 코일은 30 ms의 값을 얻을 수 있었다. 모든 코일에서 측정된 결합 시정수는 KSTAR의 설계 값인 60 ms보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육·과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Bruzzone, "Coupling Current Loss in Nb<sub>3</sub>Sn Cable-in-Conduit Conductors", IEEE Transactions on applied Superconductivity, 2(1), pp. 524-527, March 2002.
- [2] A. Bonito Oliva, B.J.P. Baudouy, et al, "AC Losses in Superconducting Nb<sub>3</sub>Sn and NbTi CIC Conductors" IEEE Transactions on applied Superconductivity, 32(4), pp. 2834-2837 July 1996.
- [3] Arend Nijhuis, Niels H. W. Noordman and Herman H. J. ten Kate, "Electromagnetic and Mechanical Characterisation of ITER CS-MC Conductors Affected by Transverse Cyclic Loading, Part 1 L coupling Current Loss", IEEE Transactions on applied Superconductivity, 9(2), pp. 754 - 757, June 1999.
- [4] Nakamura, K.; Yamanouchi, M.; Hashimoto, K.; Takao, T., "Effects of contact resistance between strands with Cr/non-Cr coating in cable-in-conduit conductors", IEEE Transactions Applied Superconductivity, 14(2), pp. 1306- 1309, June 2004.
- [5] S. Lee, Y. Chu, W. H. Chung et al, "AC loss Characteristics of the KSTAR CSMC Estimated by Pulse Test", IEEE Transactions on applied Superconductivity, 16(2), pp. 771- 774, June 2006.

저 자 소 개



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



**추 용(秋 龍)**  
1970년 10월 24일생, 1993년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 2000년-2002년 삼성종합기술원 전문연구원, 2003-현재 국가핵융합연구소 선임연구원.



**이상일(李相一)**  
1969년 8월 25일생, 1992년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1994년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(공학석사), 2009년 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 (공학박사) 현재 국가핵융합연구소 선임연구원.



**박영민(洪吉童)**  
1968년 2월 7일생, 1990년 명지대학교 이과대학 물리학과 졸업, 1998년 동 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 국가핵융합연구소 책임연구원.



**박현택(朴賢澤)**  
1975년 11월 27일생, 2005년 한밭대 재료공학과 졸업, 2003년 삼성종합기술원, 2004년부터 현재 국가핵융합연구소.



**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.