

관내연선도체 초전도 자석에서 루프 전류의 형성에 관한 연구

Investigation on the Loop Current in the CICC Superconducting Magnet

김석호*, 정상권**

S. Kim*, S. Jeong**

Abstract: The fast current and field ramp-up experiment was done with the superconducting magnet that is made of three non-insulated strand CICC(Cable-In-Conduit Conductor). The shunt resistors at the joint of the magnet enabled the unbalanced current measurement which is believed to be associated with the loop current. To explain the generation of the loop current during the current ramp up, the steady-state three strand loop current model was proposed. This model gives an explanation for the relation between the loop current and the twist geometry of the strands. According to this model, the twist geometry and the surface contact resistance of the strand has significant influence on the generation of the loop current especially in the large superconducting magnet.

Key Words: superconducting magnet, magnetic field, ramp-rate limitation, loop current

1. 서 론

관내연선도체 초전도 자석은 여러 가닥의 초전도 선재가 함께 접촉하고 있기 때문에 전자기적 및 열수력학적인 복잡한 현상들이 나타나게 되어 자석의 제작 시에 많은 주의가 요구된다. 특히, 전자기적 현상과 관련하여, 초전도 자석의 안정성에 큰 영향을 미치는 한계 자속 변화(RRL : Ramp-Rate Limitation)라는 중요한 요소가 존재한다.

초전도 토카막 장치의 대형 PF(Poloidal Field) 코일 실험을 위한 US-Demonstration Poloidal Coil(US-DPC)[1]과 일본의 DPC-U [2] 실험에서 자석의 충전 속도 및 자기장의 변화율이 자석의 성능 저하에 큰 영향을 미치는 한계 자속 변화 현상이 처음 발견되었으며, 이 한계 자속 변화를 설명하기 위하여 많은 노력들이 계산과 실험을 통하여 이루어졌다[3]-[5]. 한계 자속 변화에 대한 설명은 완전하지는 않지만, 변화하는 자기장 속에서 관내연선도체 내부의 초전도 선재들 사이에 생기는 유도 기전력에 의한 전류의 불균일 분포 때문이라고 설명되고 있다. 즉, 유도 기전력에 의하여 선재들 사이를 순환하는 루프 전류(loop current)가 형성되며, 이러한 루프 전류에 의해서 초전도 선재들 간의 균일한 전류 분포가 깨지고, 특정 선재로 전류가 집중되어 흐르게 된다. 따라서, 직류 작동시의 임계 전류(critical

current)보다 작은 크기의 전류에서 특정 선재에 국부적인 퀘칭(quench)이 발생하게 된다. 뿐만 아니라, 이러한 특정 선재에서의 국부적인 퀘칭은 초전도 케이블의 퀘칭으로 이어지기도 한다. 대부분의 관내연선도체 초전도 자석은 선재들이 서로 꼬아져 있어 유도 기전력이 상쇄되도록 하지만, 선재들 사이에 작용하는 유도 기전력이 완벽한 균형을 이루지 못할 경우, 선재들 간의 접촉 저항 및 션트 저항의 크기가 매우 작기 때문에 작은 유도 기전력에 의해서도 매우 큰 루프 전류가 형성되고 이에 의한 자석의 불안정성이 야기될 수 있다.

본 논문에서는 이러한 한계 자속 변화 현상을 실험적으로 연구하기 위하여 절연되어 있지 않은 3 가닥의 NbTi 선재로 제작된 총 길이 45 m의 관내연선도체로 초전도 자석을 제작하여 실험을 수행하였다. 이때 실험에서 제작한 초전도 자석의 자기 자기장(self magnetic field)만이 초전도 선재에 작용하도록 하여 초전도 자석의 전류 충전 속도가 초전도 선재에 작용하는 자기장의 변화율과 정비례하도록 하였으며, 외부 자석의 자기장은 이용하지 않았다. 자석의 온도를 조절하여 임계 전류를 변화시켰으며, 높은 온도 즉, 작은 임계 전류 상태에서 자석의 전류를 빠르게 충전하였을 경우, 낮은 온도에서와는 다른 전류의 분포 패턴을 보였다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 정상 상태 루프 전류 모델을 제시하고, 초전도 선재의 형상 및 접촉 저항 등이 루프 전류의 형성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1.1. 한계 자속 변화(RRL) 실험

실험에서 사용한 초전도 자석은 초임계 헬륨의 강제 대류에 의한 냉각 방식을 이용하였으며, 초전도 자석의 전류는 전압 조정(voltage control) 방식을 이용하여 조절하였다.

낮은 온도에서의 전류 충전 실험의 경우, 실험에서 사용한 최대 동작 전류(660 A)는 초전도 자석의 임계 전류 값의 약 40 % 정도일 뿐더러, 대부분의 루프 전류가 관 내부에서 형성되었기 때문에 루프 전류와 관련된 전류의 불균일 분포 현상은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 대부분의 루프 전류가 션트 저항을 통하여 순환하지 않고, 관 내부에서 선재들 간의 접촉을 통하여 형성되는 이유는 절연되어 있지 않은 초전도 선재를 사용함으로써 선재들 간의 접촉 저항이 자석의 입·출구에 설치되어 있는 션트(shunt)의 저항보다 매우 작았기 때문이다. 하지만, 자석의 온도를 높여 임계 전류가 낮은 상태에서 수행한 전류 충전 실험에서는 온도에 따른 특징적인 전류 분포 현상을 나타내었다.

온도를 높인 상태에서는 전류 충전 도중에 루프 전류에 의한 관 내부에서의 국부적인 퀘칭과 전류의 재분배 및 회복을 나타내는 불균일한 전류 분포를 자석 입구에서 측정할 수 있었다.

Fig. 1 (a)와 (b)는 각각 초임계 헬륨의 낮은 온도와

* 학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 조교수

원고접수 : 1999년 3월 17일

심사완료 : 1999년 4월 19일

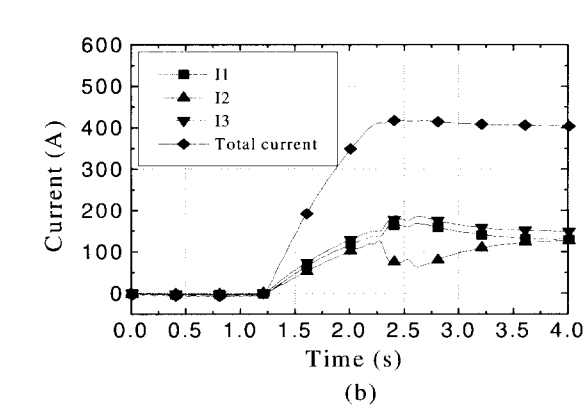
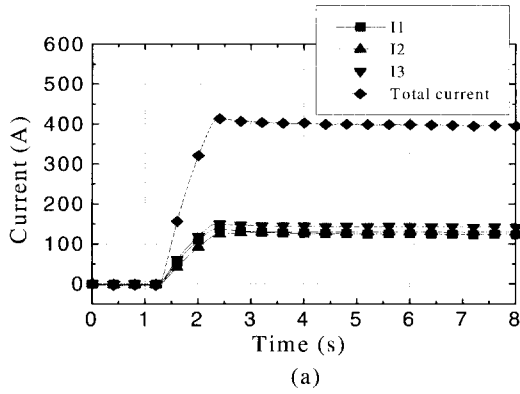


그림 1. (a) 4.5 K, (b) 6.8 K에서 430 A/s로 전류 충전.
 Fig. 1. Current ramp up with 430 A/s (a) at 4.5 K and (b) at 6.8 K.

높은 온도에서 430 A/s의 속도로 400 A까지 전류를 충전하였을 경우에 초전도 자석의 입구에서 약 $1 \mu\Omega$ 의 션트 저항(shunt resistor)을 이용하여 측정된 전류 분포 형태를 나타내고 있다. 여기서 I1, I2, I3은 각각의 선재를 구분하기 위한 것이다. Fig. 1 (a)는 낮은 온도에서 안정적인 전류 충전을 보여주고 있으며, Fig. 1 (b)는 전류 충전 종료 직후, 2번 선재에서 국부적인 퀵치가 발생하여 전류가 1번 및 3번 선재로 재분배하는 것을 나타내고 있다. 또한, 시간이 지나감에 따라 다시 정상적인 전류 분포로 회복하는 것을 보여주고 있다. 본 실험에서 나타난 선재의 국부적인 퀵치는 선재들 간의 불균일한 전류 분포 즉, 특정 선재로의 전류 집중에 기인하여 발생된다고 생각될 수 있다. 하지만, 실제 Fig. 1 (b)의 결과에서는 2번 선재의 전류가 다른 선재의 전류보다 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 Fig. 1 (b)의 결과가 퀵치가 발생하였을 것으로 예상되는 최대 자기장 발생 위치에서의 전류 분포가 아니라, 자석의 입구에 위치한 션트 저항에서 측정된 전류 분포이기 때문이다. 즉, 자석의 입구에서는 2번 선재의 전류가 다른 선재에 비하여 작을지라도 자석 내부의 퀵치 발생 지점에서는 오히려 더욱 많은 전류가 2번 선재에 흐를 수 있음을 의미한다. 이처럼 선재의 위치에 따라서 전류 분포가 다를 수 있는 것은 절연되어 있지 않은 초전도 선재를 사용하였기 때문이다. 하지만, 자석의 퀵치 발생 지점이 관 내부임에도 불구하고 Fig. 1 (b)의 실험 결과처럼 관 내부의 국부적인 퀵치에 의한 전류의 재분배 현상을 자석 입구에 위치한 션트 저항에서의 전류 분포

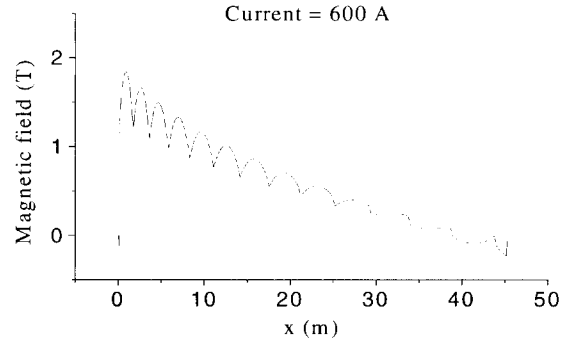


그림 2. CICC 자석의 자기장 분포.
 Fig. 2. Magnetic field distribution for the CICC of the magnet.

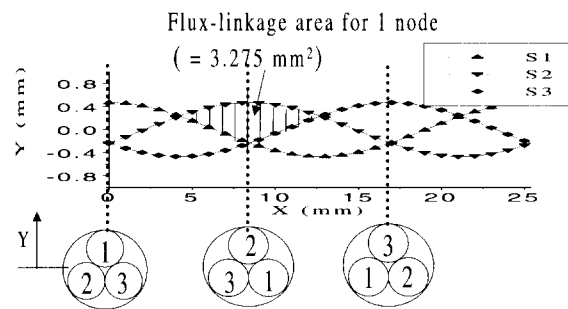


그림 3. 3 가닥 모델의 자속 연결 면적.
 Fig. 3. Flux-linkage area for 3 strand model.

를 통하여 관찰할 수 있었던 것은 퀵치가 발생할 것으로 예상되는 최대 자기장 발생 지점과 입구 쪽 션트 저항과의 거리가 약 50 cm로 매우 가깝기 때문이다. 즉, 국부적인 퀵치가 관 내부의 2번 선재에서 발생하여 이 곳의 저항이 갑자기 증가하게 되면, 2번 선재로 흐르던 전류가 선재의 접촉 저항 및 션트 저항을 통하여 주위의 1번 및 3번 선재로 재분배하여 흐르게 되는데, Fig. 1 (b)는 션트 저항을 통한 전류의 재분배를 보여주는 것이다. 또한, 전체 전류의 충전이 완전히 끝난 후에는 자기장의 변화가 존재하지 않으므로, 루프 전류가 소멸하게 되고 퀵치에서 회복되어 정상적인 전류 분포 형태로 복귀하는 모습을 관찰할 수 있었다. 이러한 실험 결과는 충전 속도를 좀더 빠르게 하였을 경우에도 반복적으로 나타났으며 초임계 헬륨의 온도를 높일수록 2번 선재에서의 전류 감소가 일찍 나타났다.

2.2.2. 루프 전류와 3 가닥 선재 모델

각각의 선재로 흐르는 전류의 양은 식 (1)과 같이 각 선재의 전달 전류(transport current)에 루프 전류의 크기만큼 더해진 값이 된다.

$$I_{total} = I_{app}/N + I_{loop} \quad (1)$$

여기서, I_{total} 은 각각의 초전도 선재로 흐르는 총 전류이다. I_{app} 는 초전도 자석에 흐르는 총 전달 전류(transport)이고, N 은 관내연선도체를 구성하는 초전도 선재의 수이다. 따라서, I_{app}/N 은 관내연선도체 내의 선재들 간에 전류가 균일하게 분포할 경우 각각의 선재로 흐르는 전류를 나타낸다. I_{loop} 는 각각의 선재에서 형성되는 루프 전류의 크기를 나타낸다. 만일, 변화하는

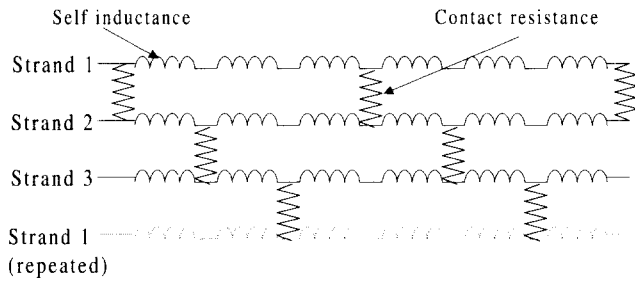


그림 4. 루프 전류에 대한 3 가닥 모델 회로.
Fig. 4. 3 strand model circuit for the loop current.

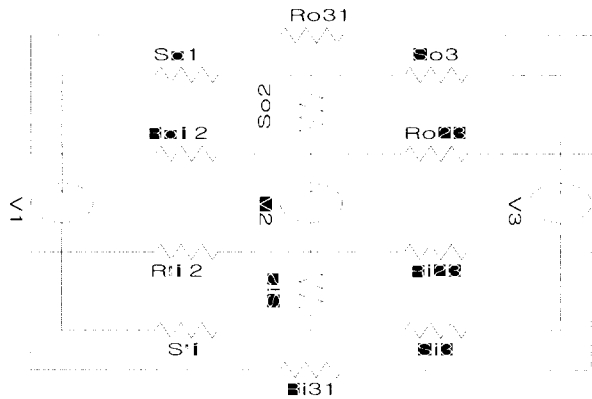


그림 5. 루프 전류에 대한 3가닥 정상 상태 모델 회로.
Fig. 5. Steady state 3 strand model circuit for the loop current.

자기장에 의해 특정 선재의 특정 위치에서 I_{loop} 가 커져서 I_{total} 이 임계 전류 이상이 되면 켄치가 발생하게 되는 것이다.

이러한 루프 전류의 형성에 관한 연구를 수행하기 위하여 실제 실험 조건과 유사한 자기장 분포 및 선재의 형상에 대한 정상 상태 3 가닥 모델을 제시하고 각 선재의 위치에 따른 루프 전류의 크기를 계산하였다.

Fig. 2는 600 A의 전류가 흐를 경우 총 길이 45 m의 관내연선도체에 작용하는 자기장의 세기를 보여주고 있으며, 자기장의 세기가 반복적으로 증가 감소하는 것은 보빈(bobbin)에 총 14 층의 관내연선도체를 연속적으로 감아서 자석을 제작하였기 때문이다. Fig. 3은 관내부에 1 inch의 피치를 갖고 서로 꼬여있는 초전도 선재를 나타내며, 자속 연결 면적은 초전도 선재의 중심축을 기준으로 계산하였다. 이러한 유한한 크기의 자속 연결 면적을 통하여 자기장이 변화하면 페러데이 법칙(Faraday's law)에 의하여 유도 기전력이 형성되고, 유도 기전력에 의하여 루프 전류가 형성되는 것이다. 하지만, 2 가닥 이상의 선재가 함께 있을 경우, 루프 전류를 계산하는 것은 고려해야 할 변수가 많아져 매우 복잡해지며, 실제 자석에 대한 정량적인 적용이 매우 힘들게 된다.

본 논문에서는 이상화된 여러 변수들을 고려하고, 유한한 크기의 노드를 생각함으로써 정상 상태에서의 루프 전류를 보다 쉽게 계산할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한, 비정상 상태에서 루프 전류의 변화는 정상 상태의 값으로부터 계산할 수 있음을 알 수 있다[5].

Fig. 4는 실제 비정상 상태의 루프 전류를 계산하기 위한 3 가닥 선재 모델로서 선재의 자기 인덕턴스(self-inductance)를 고려한 모델 회로이다. 이 경우 인덕턴스를 고려하였기 때문에 시간에 대한 루프 전류

표 1. 정상 상태 3 가닥 모델에 대한 계산 변수.
Table 1. Calculation parameters for steady-state 3 strand model.

Parameter	Value
Ramp-rate	600 A/s
Shunt resistance	$1 \times 10^{-6} \Omega$
Contact resistance for 1 m	$1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
Twisting pitch	1 inch

를 계산하기 위해서는 선재 전체를 함께 고려하여 계산을 해야 한다. 하지만, 선재들의 인덕턴스를 무시하면 각각의 자속 연결 면적 노드에 대하여 Fig. 5와 같은 단순화된 회로를 생각할 수 있다. 즉, Fig. 3과 같은 초전도 선재의 꼬임 형상에 따라 1 피치 당 6 개의 자속 연결 면적 각각을 하나의 노드로서 고려한 전기 회로이다. 여기서 S_0 와 S_i 는 각각 입구와 출구에서의 선트 저항이고, R_0 와 R_i 는 계산 노드를 중심으로 좌우 선재들간의 등가 접촉 저항이다. 또한 전압 V_1, V_2, V_3 는 1 개의 노드에서 형성되는 유도 기전력의 크기를 나타낸다. 즉, 하나의 피치를 6 개의 노드로 나눈 다음, 자속 연결 면적과 자기장 변화율을 고려하여 각각의 노드에서 작용하는 유도 기전력의 크기를 계산하였다. 계산을 수행한 총 피치 수는 1782개로서 전체 길이가 피치의 정수배가 되도록 하였다. 접촉 저항 크기는 접촉 길이에 반비례하므로 계산 노드의 위치에 따라 계산하였으며, 각 노드의 유도 기전력에 의한 루프 전류를 Fig. 5의 모델 회로를 이용하여 계산한 다음, 각각의 결과를

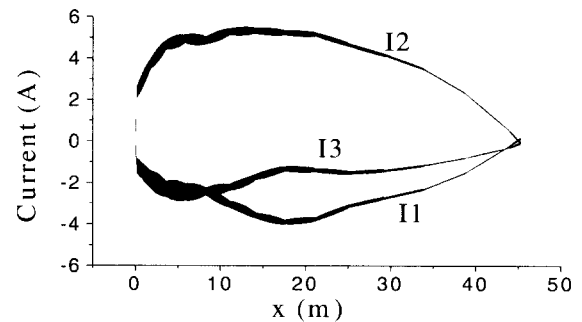


그림 6. 표 1의 계산 변수에 대한 루프 전류.
Fig. 6. Loop current for the parameters of Table 1.

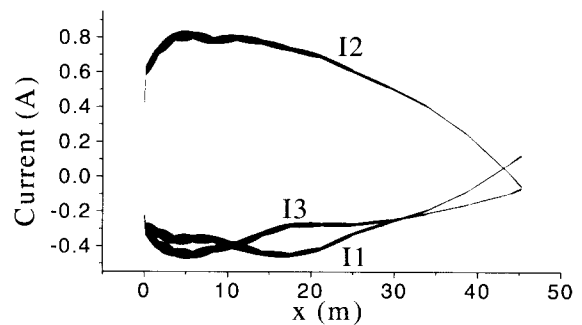


그림 7. 접촉 저항이 클 경우 루프 전류, $R_c = 1 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$.
Fig. 7. Loop current for higher contact resistance, $R_c = 1 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$.

모두 중첩하여 최종 형성되는 루프 전류의 크기를 계산하였다.

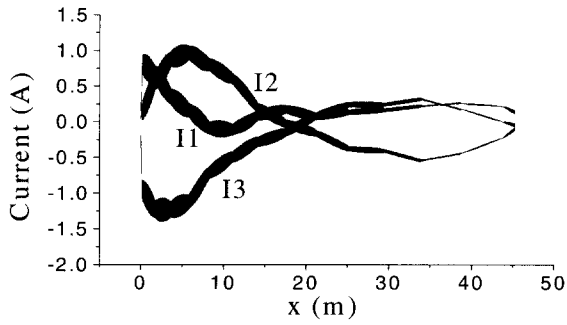


그림 8. 꼬임 피치가 1/2 inch일 경우 루프 전류.
Fig. 8. Loop current for the twist pitch of 1/2 inch.

2.2.3. 계산 결과 및 고찰

정상 상태에서의 3 가닥 모델을 통하여 다양한 크기의 접촉 저항과 선재의 형상에 따라 형성되는 루프 전류의 크기를 계산하였다. 다음의 계산 결과들은 특별한 언급이 없는 한, Table 1에서의 변수 값을 기준 계산 조건으로 사용하였으며, 그림에서 I1, I2, I3은 각 선재들의 위치에 따른 루프 전류의 크기를 나타낸다.

실험에서 사용한 초전도 자석에서 선재들 간의 접촉 저항은 매우 작아서 측정할 수 없었으며, 절연되어 있지 않은 초전도 선재에 대한 접촉 저항 값은 문헌의 값을 참조하여 계산 변수로 사용하였다. Fig. 3의 6 개의 노드 중 어느 것을 시작 노드로 계산하느냐에 따라 크기는 같고 방향만 다른 루프 전류가 형성되는 것을 알 수 있었으며, 본 논문에서는 2 번 선재에서 가장 큰 양의 루프 전류가 형성되는 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

Fig. 6은 Table 1의 계산 조건에 대한 결과이고, Fig. 7은 Table 1의 계산 조건 중 접촉 저항의 크기를 $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 로 증가 시켰을 경우의 계산 결과이다. 선재들 간의 접촉 저항이 커지면, 같은 유도 기전력에 대하여 형성되는 유도 전류가 작아져 결과적으로 전체적인 루프 전류의 크기도 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 Table 1의 계산 조건에 대하여 꼬임 피치를 1/2 inch 줄였을 경우의 결과이다. 꼬임 피치와 루프 전류가 반비례하는 것은 꼬임 피치가 줄어들수록, 자기장 변화율이 위치에 따라 다르더라도 작은 꼬임 피치 각각의 노드에 의해서 형성되는 루프 전류가 이웃한 노드들에 의하여 효과적으로 상쇄되기 때문이다.

Fig. 8의 결과처럼 루프 전류는 이웃하는 노드에 의한 효과적인 상쇄가 매우 중요한데, 이의 영향을 살펴보기 위하여 선재들이 불완전한 꼬임을 이루고 있을 경우에 대하여 루프 전류를 계산하였다. 불완전한 꼬임이란 꼬임 피치가 일정하지 않은 것으로서 특정 노드의 자속 연결 면적이 크거나 작은 것을 의미한다. 이에 앞서 Table 1의 계산 조건에서 하나의 노드에 의한 루프 전류를 계산하였으며, Fig. 9는 관내연선도체 중심의 한 노드에서 2 T/s의 자기장 변화율에 의해 발생하는 루프 전류를 보여주고 있다. 이 때 하나의 노드에 의해 발생하는 루프 전류의 크기가 매우 큰 것을 알 수 있었으며, Fig. 10은 이러한 꼬임에 의한 루프 전류의 상쇄를 알아보기 위하여 Table 5의 계산 변수에 대하여 관내연선도체 중심에 위치한 노드 하나의 면적이 10 % 증가하였을 경우 형성되는 루프 전류의 크기를 보여주고 있다. 이처럼 자속 연결 면적의 불균형이 있을 경우 큰 루

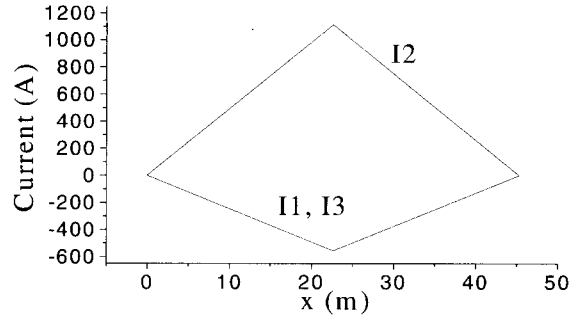


그림 9. CICC 중심에서 dB/dt = 2 T/s인 단일 노드에 의해 형성되는 루프 전류.

Fig. 9. Loop current created by single node at the center of CICC with dB/dt = 2 T/s.

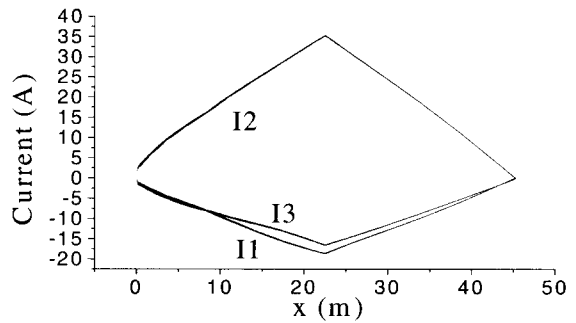


그림 10. CICC 중심의 자속 연결 면적이 10 % 증가하였을 경우 불완전한 꼬임에 의한 루프 전류.

Fig. 10. Loop current for the imperfect twisting when flux-linkage area is increased by 10 % at the center of CICC.

프 전류가 형성됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 빠른 전류 충전 실험 중에 관찰할 수 있었던 루프 전류의 형성을 설명하기 위하여 3 가닥 정상 상태 모델을 제시하고, 루프 전류의 크기와 선재들의 형상 및 접촉 저항과의 관계에 대하여 알아보았다.

해석 결과로부터 루프 전류의 크기는 선재의 꼬임 피치가 작을수록, 접촉 저항이 클수록 작아지는 것을 알 수 있었다. 하지만, 꼬임 피치는 선재의 기계적 성질의 한계로 인하여 충분히 줄일 수 없다는 한계성을 갖고 있으며, 선재들 간의 접촉 저항의 경우, 그 값이 커지면 루프 전류의 크기는 작아지지만, 특정 선재에 국부적인 켄치가 발생하였을 경우, 전류의 재분배에 의한 안정성 회복 측면에서 매우 불리하기 때문에 자석 전체의 안정성에 악영향을 미칠 수 있게 된다.

따라서, 초전도 자석의 설계에는 자석의 작동 조건 및 초전도 선재의 형태에 따라 최적의 접촉 저항 및 꼬임 피치를 결정해야 하며, 완벽한 꼬임 피치를 갖는 초전도 자석을 제작하여야 한다. 특히, 여러 단계의 꼬임 피치를 갖고 있는 대형 초전도 자석의 경우 전체 꼬임 피치를 최소로 줄이기 위해서는 각 단계의 꼬임 피치를 전 단계의 정수 배로 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 KSTAR 프로젝트 연구비에 의해 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. M. Steeves, M. Takayasu, T. A. Painter, M.O. Hoenig, T. Kato, K. Okuno, H. Nakajima and H. Tshuji, "Test results from the Nb₃Sn US-Demonstration Poloidal Coil," Adv. Cryo. Eng. vol. 37A, pp. 345-354, 1991.
- [2] N. Koizumi, K. Okuno, Y. Takahashi and S. Shimamoto, "Stabilized operation of 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U) with uniform current distribution in conductors," Cryogenics, vol. 34, pp. 1015-1022, 1994.
- [3] S. Jeong, M. Takayasu, J. V. Minervini and J. H. Schultz, "Ramp-rate limitation of cable-in-conduit conductors with supercritical helium," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 5, pp. 210-213, 1995.
- [4] N. Koizumi, Y. Takahashi, T. Kato, H. Tsuji, M. Ono, T. Hamajima and M. Takayasu, "Analysis of the current imbalance in a large CICC consisting of chrome plated strands," Proceeding of 15th international conference on magnetic technology, part I, pp. 453-456, 1997
- [5] L. Krempasky and C. Schmidt, "Ramp-rate limitation in large superconducting magnets due to 'supercurrents'," Cryogenics, vol. 36, No. 6, pp. 471-483, 1996.

저자 소개



김석호(金錫鎭)

1975년 3월 2일 생, 1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 1999년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일 생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수