

초전도 관내연선도체 접합부에서의 전류 불균일에 대한 수치적 분석

Numerical analysis about current non-uniformity in superconducting CICC (cable-in-conduit conductor) joint

이상일^{1,*}, 정상권², 최성민³, 박갑래⁴

Sangil Lee^{1,*}, Sangkwon Jeong², Sung-Min Choi³, Kaprai Park⁴

Abstract: This paper presents transport current non-uniformity in a joint for superconducting multistage cable-in-conduit conductor (CICC) and relaxation in the CICC. The joint is considered to have a current loop linked to an external magnetic field so that it becomes an emf voltage source. It is numerically analyzed using an electrical transmission line model. The inductive current in a resistive joint is compared to that of a non-resistive joint when the ramping field is applied vertically to the joints. Regarding the parameter values of the model, a full scale Nb₃Sn CICC and a strand-to-strand (STS) joint for the toroidal field magnet of the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) device are referenced to. It is found that the resistive joint prevents the current from rising too much and enhances decaying the current when the ramping stops. The 'flattop' current is found to be proportional to the ramp rate of the field (dB/dt). The relaxation length, which is defined as the length within which the maximum induced current falls by 1/e, is found to saturate within 0.27 m.

Key Words: current non-uniformity, relaxation length, cable-in-conduit conductor, joint, KSTAR.

1. 서 론

관내연선도체(Cable-In-Conduit Conductor, CICC)는 핵융합장치에 필요한 대형 초전도 자석을 만드는 데 가장 널리 사용되고 있는 초전도 도체의 한 형태이다. 관(conduit) 내부에는 직경 1 mm 내외의 초전도 선재와 무산소동 선재 수백가닥으로 만들어진 케이블이 들어가 있다. 케이블은 보통 처음에 3가닥의 선재를 마지막에는 5~6개의 단위케이블(subcable)을 합쳐 꼬아 만든 것으로서 전체적으로 4~5 단계의 케이블링 공정을 거쳐 만든다. 초전도 선재는 내부에 수 μm 직경의 초전도 극세선(filament) 수천가닥이 들어가 있는데, 현재 핵융합장치용 초전도 재료로 NbTi와 Nb₃Sn를

가장 널리 사용하고 있다. 초전도 선재를 합쳐 케이블을 만들 때 꼬아 줄뿐만 아니라 선재 자체도 나선형으로 비틀어 주게 되는데 이 모든 이유는 전자기 유도현상에 의하여 선재 혹은 도체에 수직으로 걸리는 자기장이 시간에 따라 변할 때 거대한 전류루프가 생기는 것을 방지하기 위함이다.

비록 선재들이 꼬아져 있다 하더라도 선재들 사이에는 0이 아닌 선다발이음면적(Flux Linkage Area, FLA)이 존재하여 전류가 유도될 가능성이 있다. 공간적으로 균일한 자기장이 도체에 수직으로 인가되는 경우에는 선재들이 꼬여 있음으로 해서 루프전압이 서로 상쇄되어 유도전류가 발생되지 않는다. 그러나 실제로는 공간적으로 균일하지 않은 자기장이 걸리는 경우가 대부분이다. 이 때문에 서로 상쇄되지 않은 루프전압에 의하여 유도전류가 발생되어 전기저항이 없는 초전도 선재를 따라 흐르게 되므로 큰 값의 시정수를 갖게 된다. Krempasky 등은 러더퍼드 케이블로 만들어진 가속기용 초전도 자석에서 이 같은 현상을 발견하고 이를 두 가닥의 꼬여진 초전도 선재를 가지고 해석하는 이론을 제시하였으며 실험을 수행하여 이론과 비교 분석하였다[1-2]. Bottura 등은 Krempasky 등의 이론을 확장하여 여러 가닥의 초전도 선재로 이루어진 케이블에서의 전류 분포를 구할 수 있는 이론적 도구를 제시하였다[3].

여러 가닥의 선재로 이루어진 초전도 도체에서의 전류 불균일 상태, 즉 각 선재에 흐르는 수송전류가 동일하지 않은 상태는 초전도 접합부에서 선재마다 접촉 저항이 다름으로 인해서 생기는 것이 있고, 앞서 설명한 바와 같이 유도전류에 의해 생기는 것으로 구분된다. 특히 후자는 초전도 자석의 운전 시 한계자속변화(Ramp Rate Limitation, RRL)로 인한 운전마진의 감소, 자기장의 왜곡 등의 심각한 문제를 일으킬 수 있다[4-6].

지금까지 연구자들은 초전도 도체 내에서 생성되는 유도전류에 의한 영향을 주로 살펴보았다. 초전도 도체에서 뿐만 아니라 접합부가 유도전류원이 되는 경우도 있다. 예를 들어 KSTAR 토로이달 자석(toroidal field coil, TFC)에 사용되는 STS (strand-to-strand) 접합부¹는 그 개념이 Fig. 1(a)에서 보는 것과 같은데 DC 저항을 낮추기 위하여 선재와 선재를 직접 납땜하여 연결하는 방식의 접합부이다. 실제 접합부 단면을 보면 Fig. 1(b)에서와 같이 사각형의 TFC용 Nb₃Sn CICC와 원형의 버스라인용 NbTi CICC에서 온 각각의 3연선(triplet) 4개가 층을 이룬 것이 서로 번갈아 가며 원통면상에 배치되어 있고 선재 사이 빈 공간은 땀납으로 채워져 있다. 이처럼 선재가 펼쳐져 있는 경우 케이블에서와 같은 정도의 루프전압의 상쇄 효과를 기대할 수 없게 되어 유도전류가 생성될 수 있다. 이러

¹정 회 원 : 한국과학기술원 원자력및양자공학과

²정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과

³비 회 원 : 한국과학기술원 원자력및양자공학과

⁴비 회 원 : 핵융합연구센터 책임기술원

*교신저자 : silee@nfrc.re.kr

원고접수 : 2007년 6월 29일

심사완료 : 2007년 8월 29일

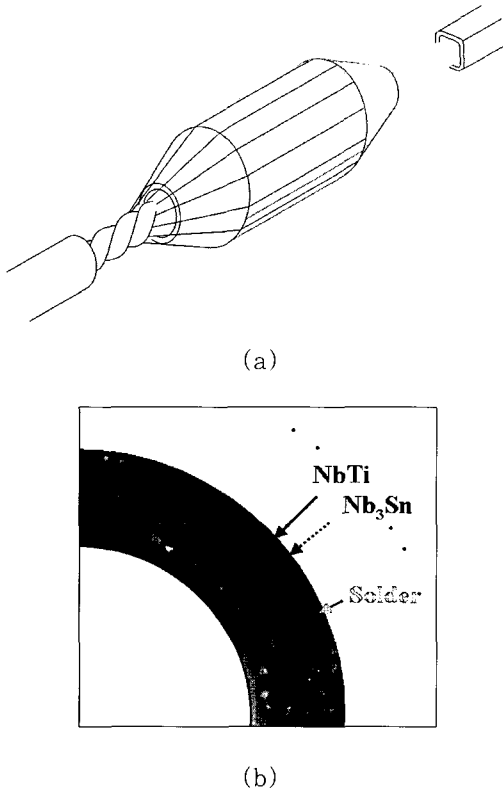


Fig. 1. (a) Conceptual drawing and (b) real cross section (90° section) of the STS joint.

한 접합부는, 다른 형태의 접합부도 대부분 그렇지만, 전류 경로 상에 상전도 물질로 이루어진 계면이 존재하여 전기저항을 가지게 되는데 이 전기저항이 전류 불균일에 미치는 영향을 살펴보는 것이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위하여 접합부가 저항을 가지고 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 유도되는 전류를 수치해석 방법으로 구하여 비교 분석하였다. 이와 더불어 접합부 저항 변화와 유도전류와의 관계, 그리고 유도전류가 도체 쪽으로 어느 정도 전파되고 완화되는지 등에 대해 논의하도록 한다.

2. 수치해석

2.1. 해석 모델 및 지배 방정식

접합부에 수직으로 인가되는 외부 자기장의 변화에 의해 접합부에서 유도되는 전류는 접합부와 연결된 도체 내의 케이블 또는 선재를 따라 도체 내부로 흘러가는데 그 중 일부는 접합부 쪽으로 되돌아온다. 접합부를 중심으로 양 쪽이 대칭이라고 가정하고 한 쪽을 등가회로로 나타내면 Fig. 2에서 보는 것과 같은 전송선 모델로 간단히 표현할 수 있다. 그림의 R, L, G, C는 각각 단위저항[Ω/m], 단위인덕턴스(H/m), 단위전도도(S/m), 단위전기용량(F/m)을 의미한다. 전송선 모델은 여러 가닥의 초전도 선재로 이루어진 도체에서의 전류 불균일 현상을 해석하는데 상당히 유용한 것으로 알려져 있다[3-7].

초전도 도체의 경우 두 개의 전송선이 되는 초전도 케이블 또는 선재 쌍이 CICC 내부에서 서로 접촉하고 있으므로 단위전기용량 C는 0이다. 이 때 지배 방정식은 다음과 같다.

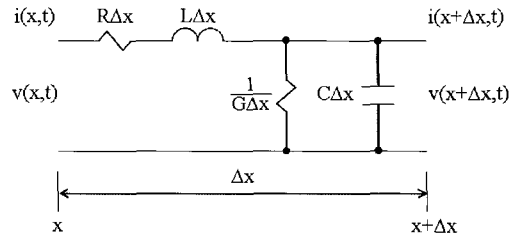


Fig. 2. Transmission line model.

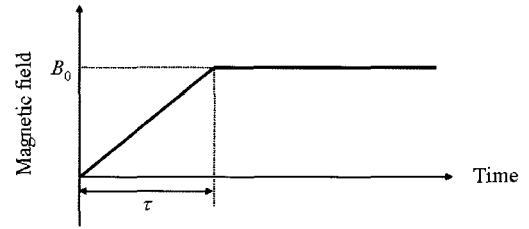


Fig. 3. Applied waveform.

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gv(x,t) \quad (2)$$

위 두식을 결합하여 정리하면 다음과 같이 서로 동일한 형태를 가지는 두 개의 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{LG} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} - \frac{R}{L} v(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{LG} \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} - \frac{R}{L} i(x,t) \quad (4)$$

접합부를 $x = 0$ 에 위치하는 한 점으로 간주하고 Fig. 3에서와 같은 파형이 인가되었을 때 FLA가 0이 아닌 접합부에서는 다음과 같은 기전력이 유기된다.

$$v(0,t) = \epsilon_0, \quad 0 < t \leq \tau \\ = 0, \quad t > \tau \quad (5)$$

여기서 $\epsilon_0 = \Phi/\tau$ 이고 Φ 는 접합부 횡단면에 수직으로 인가되는 자기장의 변화에 따른 자기다발의 변화량을 의미한다.

2.2. 수치해석 방법

수치해석에 있어서 도체의 어느 지점에서 전류가 0이 되는지 모르기 때문에 다른 한 쪽의 경계 조건은 줄 수 없다. 따라서 한 쪽 경계가 열려 있는 경우에 사용할 수 있는 양적유한차분법(explicit finite difference method)을 적용하여 해를 구한다.

식 (3)은 식 (5)와 같은 경계조건이 주어져 있으므로 풀 수 있으나 식 (4)는 그렇지 못하다. 유도전류는 주어진 기전력에 대해 시스템이 어떻게 반응하는가를 나타내는 일종의 종속적인 변수이기 때문에 전류에 대한 경계조건은 식 (1)에 의하여 간접적으로 얻는다. (1)식에서 보면 $x = 0$ 근처에서 시간에 따른 전압 분포를 알아야 하는데 이는 (3)식으로부터 구할 수 있다. 해가 정확하기 위해서는 메시의 크기가 충분히 세밀해야 하는데, $R = 0$ 인 경우에 존재하는 이론적인 해와 비교함으로써 메시의 크기를 결정한다.

Table 1. Specifications of the KSTAR TFC conductor.

Superconductor	Nb ₃ Sn
Strand diameter	0.78 mm with Cr plating
Cr plating thickness	1 μm
Number of strands	486
Cabling pattern	(2SC+1Cu)x3x3x3x6 SC: superconducting strand, Cu: copper strand
Cable twist pitch	40, 73, 157, 227, 355 mm
Conduit material	Incoloy 908
Conduit dimensions	w25.65, h25.65, t2.86 mm

KSTAR TFC에 사용되는 Nb₃Sn CICC는 Table 1에서 보는 것과 같이 3연선은 초전도 선재 2가닥과 무산소동 선재 1가닥으로 이루어져 있으며 초전도 케이블은 6개의 단위케이블(sub-cable)로 이루어져 있다. 계산에 사용된 특성치는 이 도체의 특성을 어느 정도 반영한 값인데 단위저항 R, 단위인덕턴스 L, 단위전도도 G 값으로는 각각 240 nΩ/m, 5.0×10⁻⁷ H/m, 5.63×10⁷ S/m을 사용하였다. FLA 값으로는 STS 접합부의 특성을 고려하여 1.8×10⁻³ m²를 사용하였다. 참고적으로 전송선이 한 쌍의 단위케이블인 경우를 상정하여 실규모 CICC 시편을 열처리한 후 아무런 힘을 가하지 않은 상태에서 측정된 L, G 값은 각각 5.6×10⁻⁷ H/m, 3.55×10⁸ S/m이다.

KSTAR 기준 운전 시나리오의 경우 TFC 접합부에 인가되는 자기장은 일곱 단계에 걸쳐서 변한다. 이들 단계간 자기장 변화는 절대값으로 따졌을 때 최소 0.013 T에서 최대 0.36 T이고, 단계간 소요시간(Fig. 3의 τ에 해당)은 0.06, 1, 3.94, 6, 19, 30 s 등이다. 계산에 있어서는 자기장의 크기(Fig. 3의 B₀에 해당)는 최소값인 0.013 T로 고정하였으며 τ는 그대로 사용하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

접합부 저항이 없는 경우에는 (3)식과 (4)식의 이론 해석적인 해가 존재한다는 것이 알려져 있다[2]. 이 해를 이용하여 수치해석에 의하여 얻어진 해에 존재하는 오차를 살펴보았다. Fig. 4의 τ = 3.94 s인 경우에서 보면 자기장 상승 시에 평균 -2.0%, flattop에서는 평균 0.026%이다. 이 오차는 τ 값에 관계없이 동일하다는 것을 확인하였다. 따라서 수치해석 방법으로 유도전류를 상당히 정확하게 계산할 수 있다는 것을 알 수 있다.

접합부 저항에 의해 유도전류가 억제될 것이라고 예상할 수 있지만, 그 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여 접합부 저항이 있을 때와 접합부 저항을 0이라고 놓았을 때 수치해석에 의해 얻어지는 유도전류 파형을 비교하여 보았다(Fig. 5). 그 결과 예상한 것과 같이 전자의 경우에는 후자에 비해 유도전류의 크기가 줄어들었으며 자기장의 변화가 멈추었을 때 전류가 매우 더디게 감쇄하는 후자와 달리 전류가 급격히 소멸하는 것을 볼 수 있다. τ가 커질수록, 즉 자기장이 느리게 변할수록 전류억제의 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 예를 들어 후자의 최대 전류값을 기준으로 한 전자와 후자의 최대 전류값 사이의 비를 보면 Fig. 5(a)의 τ =

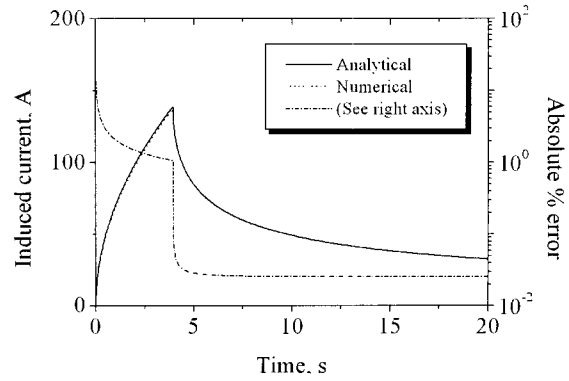
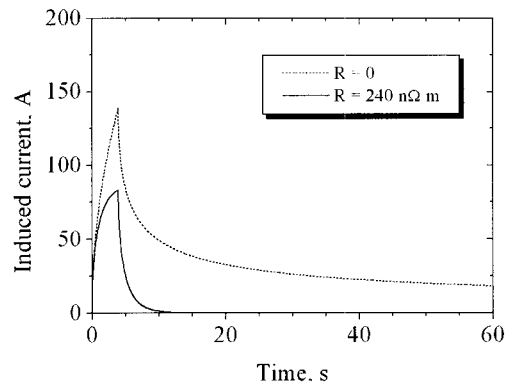
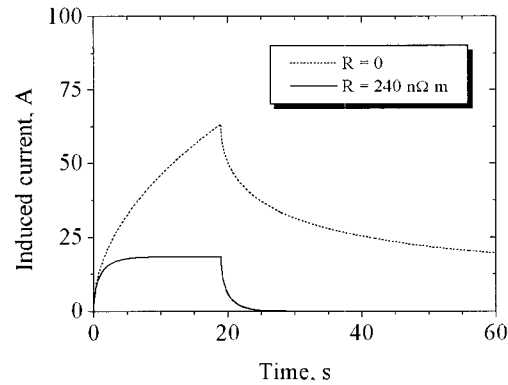


Fig. 4. Error of numerical analysis.



(a) τ = 3.94 s



(b) τ = 19 s

Fig. 5. Effect of the joint resistance on the induced current.

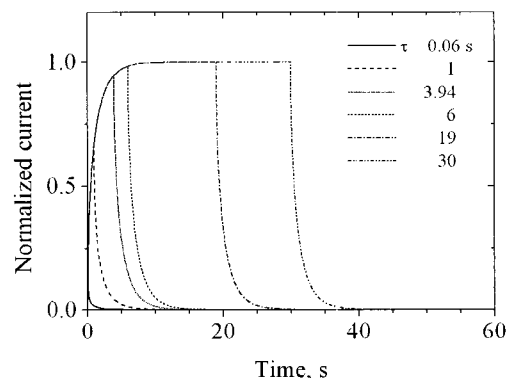


Fig. 6. Induced current profiles which are normalized to their own maximum currents and re-scaled by the profile with τ = 19 s or 30 s.

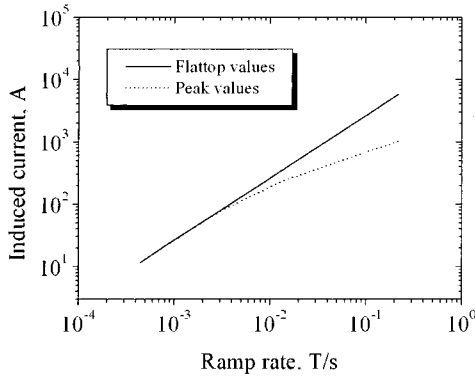


Fig. 7. Flattop and peak induced currents according to the ramp rate variation.

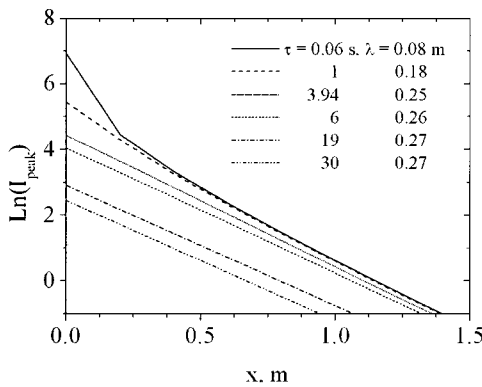


Fig. 8. Peak induced current (I_{peak}) variation along the Nb_3Sn CICC: Legend λ denotes relaxation length, which is the inverse slope of the curve in the cases of $\tau \geq 6$ s and is the interpolated value in the others.

3.94 s일 때는 0.6인 반면 Fig. 5(b)의 $\tau = 19$ s일 때 0.29로 더 작다.

Fig. 6는 외부 자기장의 상승시간 τ 의 변화에 따라 유도전류 파형을 보여주는 것으로, 유도전류 파형을 각자의 최대 전류값에 의해 정규화(normalization) 시킨 다음 flattop을 가지고 있는 $\tau = 19$ s 또는 30 s인 파형을 기준으로 다른 파형들을 re-scaling하여 얻은 그래프이다. 모든 경우에 대해 유도전류가 감소할 때의 모양이 거의 같은 것을 알 수 있다. 또한 약 11 s 되는 지점에서 flattop이 시작된다는 것을 알 수 있다. 파형의 모양이 같다는 것은 시정수(time constant) 또한 거의 같다는 것을 의미한다. 그래프로부터 시정수는 1.9 s로 얻어지는데 L/R 로 계산한 시정수 2.1 s와는 약간의 차이가 있다. 이 차이는 감쇄를 시작할 때 약간의 곡률을 가지는 것과 더불어 단위전도도 G 의 영향으로 판단된다.

한편 τ 혹은 dB/dt 의 변화에 따른 최대 유도전류의 크기를 정량적으로 분석하였다. 이를 위하여 flattop을 가지고 있는 파형들을 이용하여 그렇지 않은 파형들의 가상 flattop 전류값을 구하였다. Fig. 6의 $\tau = 6$ s 파형의 경우를 예를 들면 이 파형은 $t = 6$ s에서 peak 전류값을 가지는데, 이 값과 같은 시각에 $\tau = 19$ s (또는 $\tau = 30$ s) 파형이 가지는 전류값 사이의 비율로 후자 파형의 실제 flattop 전류값을 나누어주어 전자 파형의 가상 flattop 전류값을 얻는다. Fig. 7은 이렇게

얻은 가상의 값을 포함하는 flattop 전류값들을 dB/dt 에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 명확히 확인할 수 있는 것과 같이 dB/dt 가 증가함에 따라 flattop 전류는 선형적으로 증가한다. 반면에 peak 전류값들은 dB/dt 가 어느 정도 커지면 flattop 전류값과 격차가 생기기 시작하고 dB/dt 가 더 커지면 이 격차는 점점 더 벌어진다. Flattop 전류값과의 차이 - 이를 완화율이라 하자 - 는 $\tau = 6$ s($dB/dt = 2.2$ mT/s)에서는 2%이던 것이 $\tau = 0.06$ s($dB/dt = 0.22$ T/s)가 되면 82%에 달한다. 따라서 접합부 저항의 효과가 dB/dt 가 큰 영역에서 더 큼을 알 수 있다.

τ 가 일정한 상태에서 최대 유도전류값(또는 flattop 전류값)은 접합부 저항의 제공근에 반비례하여 커지는 것으로 확인되었다. 그리고 단위전도도 G 의 제공근에 비례하여, 즉 도체 내 선재 또는 케이블간 접촉저항의 제공근에 반비례하여 커지는 것으로 확인되었다. 그러나 단위인덕턴스 L 에 대한 flattop 전류는 $5.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-8}$ H/m 영역에서 위로 볼록한 완만한 포물선 모양을 나타냈으며 5.0×10^{-7} H/m에서 극대를 이루었다.

다음으로 접합부에서 유도된 전류가 도체의 어느 정도 길이만큼 영향을 미치는지에 대해 살펴보았다. Fig. 8은 이에 대해 분석한 것을 보여주는 것으로, 도체 진행 거리에 대해 전류는 대부분 지수함수적으로 감소하는 것을 보여준다. 완화거리(relaxation length) - 접합부에서 유도된 전류가 도체내로 전파될 때 $1/e$ 로 감소하는데 까지 진행된 거리를 의미 - 는 τ 가 11 s(flattop이 형성되는 시점)보다 큰 경우 0.27 m로 유지됨을 알 수 있다. 유도전류는 1.5 m 이내에서 거의 0으로 소멸된다. 한편 τ 가 시정수(1.9 s)보다 작은 경우에는 짧은 거리 내에서 급격히 감소하는 것을 보여준다. 특히 KSTAR STS 접합부 길이가 0.1 m임을 감안하면 $\tau = 0.06$ s인 경우에는 유도전류는 크지만 접합부내에서 거의 대부분 감쇄된다는 것을 알 수 있다.

지금까지는 $B_0 = 0.013$ T로 고정시켜 놓았는데 B_0 값이 달라지는 것에 의한 영향을 살펴보는 것 또한 필요하다. 수치분석 결과 유도전류는 τ 가 일정한 상태에서 B_0 의 크기에 정확히 비례하여 증가하였다. 이 결과로부터 유추해 보면 KSTAR 기준 운전 시나리오에서 B_0 값이 최대일 때가 가장 열악한 운전 상황으로 될 수 있다. 시나리오 상 최대 B_0 값은 앞에서도 언급하였듯이 0.36 T이며 이 구간에서의 τ 값은 6 s이다. $\tau = 6$ s일 때 $B_0 = 0.013$ T의 조건에서 얻어진 flattop 전류는 57.9 A이므로 $B_0 = 0.36$ T일 때의 flattop 전류는 B_0 의 비율만큼 증가하여 1.6 kA가 된다. 이 결과는 Fig. 7의 그래프에서 얻어지는 결과와도 일치한다. 즉, $dB/dt = 0.06$ T/s이므로 그래프에서 얻어지는 값 역시 1.6 kA이다. 그리고 유도전류의 최대값은, 앞에서 언급된 것과 같이 $\tau = 6$ s에서 flattop 전류의 완화율이 약 2%이므로, 1.57 kA가 된다. 이는 TF 초전도자석의 정상 운전전류인 35.2 kA의 4.5%에 해당하며 이는 일반 전력에서 허용하는 리플에 지나지 않는다.

4. 결 론

수직으로 인가되는 시변 자기장에 의하여 접합부 전류가 유도되며 이 때문에 수송전류의 불균일 현상이 나타날 수 있다. KSTAR STS(strand-to-strand) 접합부와 Nb_3Sn 관내연선도체(CICC)가 연결된 시스템의 특성이 반영된 전송선 모델을 이용하여 전류 불균일을 유발하는 유도전류의 거동에 대해 수치적으로 살펴보았다.

자기장이 변하는 시간(τ)이 충분히 긴 경우 유도전류의 파형은 접합부 저항에 의해 flattop을 형성하게 되고 자기장의 변화가 멈추는 즉시 빠르게 감쇄한다. τ 가 작은 경우에는 flattop에 도달하지 못하지만 감쇄시정수는 τ 와 상관없이 동일하며 유도되는 최대 전류의 크기 역시 접합부 저항에 의해 제한받는다. 자기장의 시간변화율(dB/dt)이 증가함에 따라 flattop 전류는 선형적으로 증가하는 반면 최대 전류는 증가폭이 급격히 둔화된다. 최대 전류의 크기는 접합부 저항의 제곱근 및 도체 내 선재 또는 케이블간 접촉저항의 제곱근에 반비례 하고, 접합부에 수직한 외부 자기장의 변화량에 정비례 한다.

KSTAR 운전 시나리오에 따라 계산된 유도 전류의 최대값은 TF 초전도자석의 정상 운전전류인 35.2 kA의 4.5%에 지나지 않으며, Nb₃Sn CICC 내로 전과할 때 모든 dB/dt 조건하에서 0.27 m보다 짧은 거리 내에서 1/e로 감소하며 약 1.5 m 이내에서 완전 소멸된다. 이들 결과를 종합해 보면 STS 접합부에서의 전류 불균일에 의하여 TF 초전도자석의 운전이 방해받는 일은 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 차세대초전도핵융합연구장치 개발사업(KSTAR 프로젝트)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] L. Krempsky and C. Schmidt, "Theory of 'supercurrents' and their influence on field quality and stability of superconducting magnets," *J. Appl. Phys.*, vol. 78, no. 9, pp. 5800-5810, 1995.
 [2] L. Krempsky and C. Schmidt, "Experimental verification of 'supercurrents' in superconducting cables exposed to AC-fields," *Cryogenics*, vol. 39, no. 1, pp. 23-33, 1999.
 [3] L. Bottura, M. Breschi, and M. Fabbri, "Analytical solution for the current distribution in multistrand superconducting cables," *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 12, pp. 7571-7580, 2002.
 [4] S. Kim and S. Jeong, "Investigation on the stability of two-strand superconducting cable related with ramp-rate limitation," *Physica C*, vol. 407, pp. 62-72, 2004.

[5] S. Jeong and M. Takayasu, "Ramp-rate limitation experiment using induced current method. Part. 1: experimental results," *Cryogenics*, vol. 42, no. 2, pp. 79-87, 2002.
 [6] N. Amemiya, "Overview of current distribution and re-distribution in superconducting cables and their influence on stability," *Cryogenics*, vol. 38, no. 5, pp. 545-550, 1998.
 [7] N. Mitchell, "Steady state analysis of non-uniform current distribution in cable-in-conduit conductors and comparison with experimental data," *Cryogenics*, vol. 40, no. 2, pp. 99-116, 2000.

저 자 소 개



이상일(李相一)
 1969년 8월 25일생, 1992년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1994년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(공학석사), 현재 핵융합연구센터 선임연구원, 한국과학기술원 원자력및양자공학과 박사과정.



정상권(丁常權)
 1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992-1995년 MIT Plasma Fusion Center 연구원, 1996년 이후 현재 KAIST 기계공학과 정교수.



최성민(崔性旻)
 1965년 12월 17일생, 1988년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1990년 동 대학원 졸업(공학석사), 1998년 MIT 원자핵공학과 졸업 (공학박사), 1998-2001년 미국 NIST 객원연구원, 2001년 이후 현재 KAIST 원자력 및 양자공학과 부교수.



박갑래(朴甲來)
 1964년 3월 19일생, 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 핵융합연구센터 책임기술원/초전도자석팀장.