

Bi계 고온 초전도 선재 부스바에서의 자기 자장 해석

강형구 나완수 주진호* 유재무** 오상수*** 류강식***
 성균관대학교 전전컴 공학부 신소재공학부* 한국기계연구원** 한국전기연구소***

**Analysis of Self Magnetic Field Effects
 in a Bi-2223 Stacked Superconducting Bus Bar**

Hyoungku Kang, Wansoo Nah, Jinho Joo*, Jaimoo Yoo**, Sang-Soo Oh***, Kang-Sik Ryu***
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Dept. of Metallurgical Engineering* SKKU, KIMM**, KERI***

Abstract - Self magnetic field in a Bus bar usually degrades the critical current in it. Actually the total critical current of a Bus bar is not the same as the sum of total critical current of each stacked HTS tape. This is due to the self field effects in a bus bar. To reduce the degradations of critical current in a bus bar, we need to analyze the self field distributions in a bus bar. Conceptually, by rearranging the each stacked tapes, the self field effects can be minimized. In this paper, we calculate the self magnetic field distributions across a bus bar analytically, with the variations of the relative angle of the two conductors in a go-and-return pair. As a result, we suggest that the optimum relative angle exist, which minimize the self field effect in a bus bar.

기본적으로 너비 $2a$ 와 두께 $2b$ 를 가지는 하나의 도체 주변에 생기는 자기장을 계산해서 실제의 부스바가 가지는 도체의 수 8개로 확장 해석하면 전체 부스바에서 생기는 자기 자장의 값을 계산할 수 있다. 그림 1에서와 같이 도체를 x 축과 y 축의 원점에 두고 θ 만큼씩 회전시킬 때 발생하는 자기 자장을 x 축 방향의 H_x 와 y 축 방향의 성분 H_y 로 나누어 구한 식이 식 (1)과 식 (2)이다.

$$H_x = \frac{I}{4\pi} [(a-x)\ln\{(x-a)^2 + (y-b)^2\} - (2x+2a)\ln(x+a) + (a+x)\ln\{(x+a)^2 + (y-b)^2\} + (2x-2a)\ln(x-a) + (2y-2b)\arctan(\frac{x+a}{y-b}) + (2b-2y)\arctan(\frac{x-a}{y-b})] - \frac{I}{4\pi} [(x+a)\ln\{(x+a)^2 + (y+b)^2\} + (2x-2a)\ln(x-a) + (a-x)\ln\{(x-a)^2 + (y+b)^2\} - (2x+2a)\ln(x+a) - (2y+2b)\arctan(\frac{x-a}{y+b}) + (2y+2b)\arctan(\frac{x+a}{y+b})] \quad (1)$$

$$H_y = -\frac{I}{4\pi} [(2x+2a)\arctan(\frac{y-b}{x+a}) + (2x-2a)\arctan(\frac{y-b}{a-x}) - (2x+2a)\arctan(\frac{y+b}{x+a}) - (y+b)\ln\{(x+a)^2 + (y+b)^2\} + (2a-2x)\arctan(\frac{y+b}{a-x}) + (y-b)\ln\{(x+a)^2 + (y-b)^2\} - (y-b)\ln\{(x-a)^2 + (y-b)^2\} + (y+b)\ln\{(x-a)^2 + (y+b)^2\}] \quad (2)$$

1. 서 론

단거리간의 DC 대전류 송전선의 부스바를 고온 초전도 선재를 이용해서 제작한다면 저항에 의해서 발생하는 전력 손실의 주를 손실은 물론이고 전압강하에 따른 전력손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전원부의 저전압화를 기할 수 있는 등의 많은 이점이 있을 수 있다(3). 이러한 고온 초전도 부스바는 여러 가지 형태가 있는데 일반적으로 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ 등의 고온 초전도선재를 적용하여 제작한다. 이때 부스바 내에 통전되는 임계전류의 총합은 자기 자장 (self magnetic field)의 효과에 의해서 각각의 선재가 가지는 임계 전류 값의 총합보다 작아지게 된다. 현재까지는 이러한 자기 자장 효과를 최소화하기 위해서 alternate go-and-return 방식 등이 실험을 통해서 제안되어져 왔다(1-3). 그런데 일반적으로 고온 초전도 선재는 외부에서 인가해주는 자장의 방향에 따라서 임계 전류 밀도의 값이 달라지는 자기적 이방성을 가지는데, 지금까지는 이러한 자기적 이방성이 부스바의 형태를 설계하는데 고려되어지지 않았다. 고온 초전도 부스바를 설계하는데 있어서 이러한 효과들을 고려한다면 최적의 성능을 가지는 부스바의 구조를 제작할 수 있게 될 것이다. 본 연구에서는 부스바가 가지는 임계 전류 총합의 감소를 최소로 하는 도체 배열 방식을 제안하기 위하여 부스바 단면에서의 자기자장분포를 해석적으로 계산하였으며, 특히 도체들의 상대적인 각도를 변화시키면서 각 위치에서 도체가 가지는 최대의 자장을 도체에 평행한 성분과 수직인 성분으로 나누어서 도시하여 자기자장효과를 최소화하는 최적 형상이 존재함을 보였다.

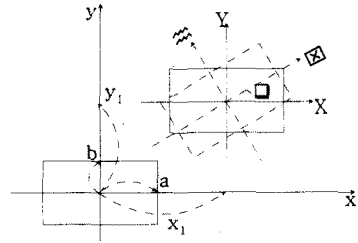


그림 1. 도체 위치의 일반화를 위한 평행이동

그런데 여기서 도체는 원점에서 x 축으로 x_1 만큼, y 축으로 y_1 만큼씩 평행이동하고 다시 θ 만큼 회전한 위치에 있으므로 축을 ξ, η 축으로 재설정해 준다.

2.2 8개의 도체를 가진 부스바의 자기장 분포

부스바 전체에서 발생하는 자기 자장을 해석하기 위해서는 도체 1개가 원점에 존재할 경우의 자기 자장을 구한 후에 각각의 실제 위치로 도체를 평행이동시켜서 중첩시켜 주어야 한다. 그림 2는 이번 해석에 사용된 부스바 단면의 모양으로써, 각각의 도체의 너비 $2a$ 는 2cm, 두께 $2b$ 는 1cm, 각각의 도체에서 원점까지의 거리 r 은 6cm, 그리고 부스바에 흘려주는 통전 전류의 값은 2000 [A]로 가정하였다. 이와 같은 가정하에서 구한 부스바 내에서의 자기 자장은 다시 각각 도체의 방향의 수직인 방향의 자계(H_{\perp})와 평행인 방향의 자계(H_{\parallel})로 나누어 해석할 수 있다.

2. 부스바 단면의 자장 계산

2.1 한 개 도체의 자기장 분포

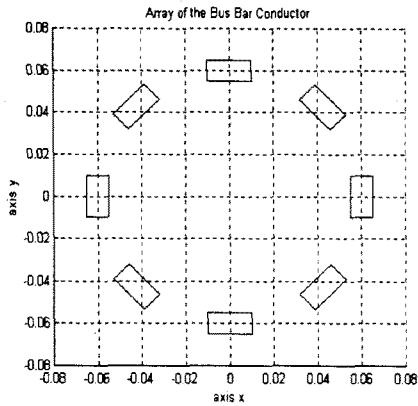


그림 2. 도체가 8개인 경우의 부스바 모델

3. 고온 초전도 선재에서의 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 특성

고온 초전도 선재는 자기적 이방성을 가지고 있으므로 외부에서 가해주는 자계의 방향에 따라 임계 전류 밀도의 값이 달라지게 된다. 즉 선재에 전류를 흘려주었을 경우에 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기가 달라지게 된다. 다음의 그림 3은 외부 자계를 변화시켜 주었을 때 초전도 선재 내부에 발생하는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기 변화를 나타낸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 일정 자계하에서 H_{\parallel} 의 임계 전류값이 H_{\perp} 의 임계 전류값보다 크을 알 수 있다.

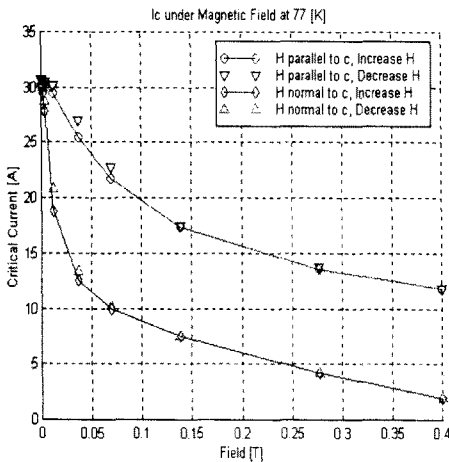


그림 3. 외부 자계에 따른 고온 초전도 선재의 임계 전류값의 변화

4 도체 배열의 변화에 따른 자기장 분포

그림 3에서 알 수 있듯이 부스바에 일정 전류를 흘려주었을 경우에 도체에 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기는 서로 각각 다르게 나타난다. 이때 부스바의 배열을 적절히 조절해 주면 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기가 서로 다르게 나타나게 되므로 도체에 유기되는 자기 자장의 효과가 가장 작게 나타나는 도체의 배열을 찾아낼 수 있을 것이다. 그림 2와 같은 부스바의 도체 배열에서 가장 상단의 중심의 도체를 I번 도체라고 하고 반시계 방향으로 배열되어 있는 순서대로 도체의 번호를 매겼다. 그런데 8개의 도체

는 대칭성을 가지므로 반시계 방향 순서대로 I번과 II번, III번과 IV번 도체의 식으로 두 도체씩 짝(pair)을 지어서 자기 자장을 계산했다. 도체들의 배열은 Whirl Type과 Star Type 부스바의 두가지로 구분하였다. 먼저 I번 도체와 II번 도체 등 모든 도체를 각각 $+\theta$ 만큼씩 회전 이동시켜준 경우의 도체배열을 Whirl Type 부스바라고 하고, I번 도체 등 홀수번째 도체는 $+\theta$ 만큼씩 회전시켜주고 II번 도체 등의 짝수번째 도체들은 $+\theta$ 만큼씩 회전시켜준 경우의 도체의 배열을 Star Type 부스바라고 정의하였다. 그림 5는 Whirl Type 부스바에

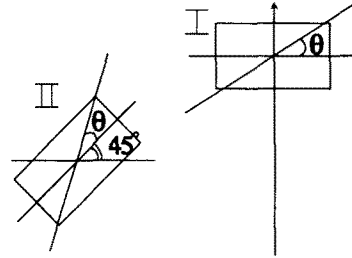


그림 4. 8개로 이루어진 부스바 중 I번과 II번 도체

서 θ 가 30° 인 경우의 자장의 분포를 나타내며 그림 6과 7은 Whirl Type 부스바의 I번 도체와 II번 도체에서 θ 에 따라 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기 변화와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비를 계산한 그림이다.

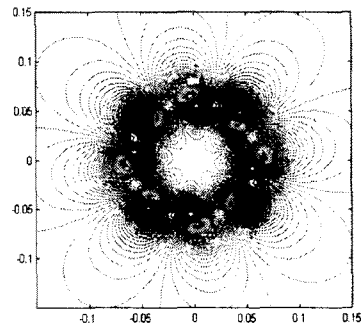


그림 5. $\theta = 30^\circ$ 인 경우의 Whirl Type 부스바가 가지는 자계(H_x)의 분포

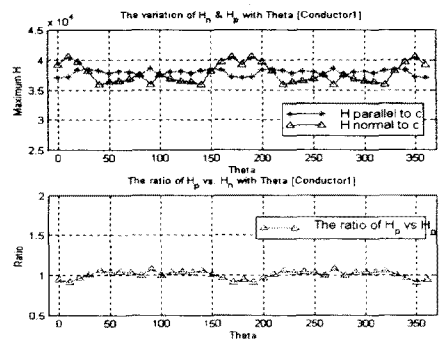


그림 6. Whirl Type I번 도체에 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비

다음으로 θ 가 60° 인 경우의 Star Type 부스바의 자기 자장을 계산하여 그림 8이 그림 8이다. 이 경우의 자기 자장을 해석하여 I번 도체와 II번 도체에서 θ 에 따라 나타나는 H_{\perp} 와 H_{\parallel} 의 크기 변화와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비를 계산한 그림이 그림 9와 그림 10이다.

5. 고찰

그림 2에서 보인 실험치의 결과에서 알 수 있듯이 도체의 외부에서 같은 크기의 자계를 가해주어도, 도체의 방향과 평행 방향으로 자계를 가해준 경우의 임계 전류의 값이 수직 방향으로 자계를 가해준 경우의 임계 전류의 값보다 크게 나타는 것을 알 수 있다. 따라서 부스바 내에 자기 자장의 효과를 최소로 하는 도체의 배열을 얻으려면 자기 자장의 방향이 최대한 도체의 방향에 평행이 되게 해주면 될 것이다. 그러기 위해서는 그림 6, 7, 9, 10에서 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비가 I 번 도체와 II 번 도체에서 동시에 최대가 되는 θ 를 찾아야 한다. 그림 6, 7과 그림 9, 10을 살펴보면 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비는 Whirl Type보다 Star Type에서 더 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 또한 Star Type중에서도 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비의 값이 I, II 번 도체 동시에 최대인 θ 의 범위는 대략 $50^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 와 $220^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 로써 그림 8은 최적화 각도의 범위내인 θ 가 60° 일 경우의 자계 분포를 나타낸다.

4. 결론

현재까지 제작되어진 부스바 내의 도체 배열은 경험을 바탕으로 한 결과로써, 외부 자계가 도체의 방향에 최대한 평행이 되게 해주는 방식이었다. 본 연구에서는, 기존의 경험적인 결과에 의존해 도체의 배열 방식을 결정하는 것에서 탈피하여 부스바 내의 도체에 유기되는 자기 자장의 값을 직접 수치적으로 분석하여 자기 자장의 효과가 가장 적게 적용되는 도체 배열을 제안하였다. 향후의 연구로써는 도체뿐만 아니라, 도체 내의 선재 적층 방식까지 수치적으로 해석하여 통전 전류에 의해 유기되는 자계가 도체에 최대한 평행이 되게 하는 부스바의 최적화 배열과 도체의 거리에 의한 최적화 배열을 연구할 계획이다. 이 연구 결과는 부스바 내에서 자기 자장에 의해서 발생하는 임계 전류 밀도 총합의 감소현상을 크게 개선하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T.Kato, T.Hikata, "Development of 10kA-Class Go & Return High-Tc Superconducting Bus Bar"
- [2] T.Ando, T.Isono, "Development of a 10kA-Class High-Tc Superconducting Bus Bar", IEEE Trans. vol.5, No.2, pp.817-820, 1995
- [3] Hyun-Man Jang, Sang-Soo Oh, "Large Current Transportation by Conductor Stacked with Bi HTS Tapes", 7th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity, 1997
- [4] H.Brechna, "Superconducting Magnet Systems", Technische Physik in Einzeldarstellungen Band 18, pp.59-67, 1973
- [5] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press, pp.261-287, 1994

본 연구는 "통상산업부의 에너지자원기술개발지원센터"의 일부 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

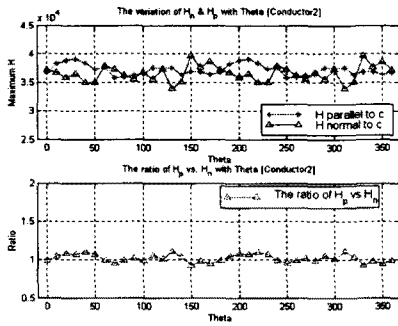


그림 7. Whirl Type II 번 도체에 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비

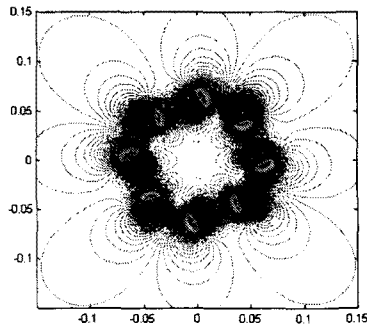


그림 8. $\theta = 60^{\circ}$ 인 경우의 Star Type 부스바가 가지는 자계(H_x)의 분포

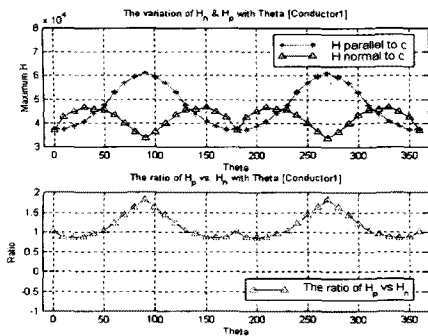


그림 9. Star type I 번 도체에 나타나는 H_{\parallel} 와 H_{\perp} 의 크기와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비

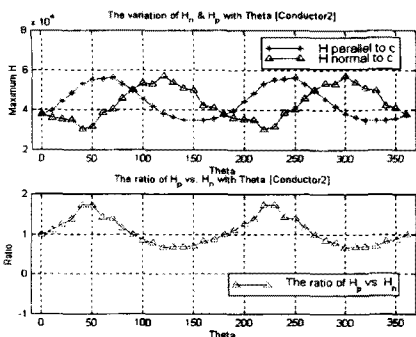


그림 10. Star type II 번 도체에 나타나는 H_{\perp} 와 H_{\parallel} 의 크기와 H_{\perp} 에 대한 H_{\parallel} 의 비