

침투자속의 위치와 이동속도에 따른 리니어형 자속펌프 충전전류의 이론적 해석

Theoretical Analysis of Charging Current of Linear Type Magnetic Flux Pump According to the Penetrated Position and Moving Speed of Magnetic Flux

정윤도^{1,*}, 배덕권², 윤용수³, 고태국⁴

YoonDo Chung^{1,*}, DuckKweon Bae², YongSoo Yoon³, TaeKuk Ko⁴

Abstract: We proposed a linear type magnetic flux pump (LTMFP) as a power supply for superconducting magnet system. In order to explain the operating mechanism of pumping action, the pumping sequence based on penetrated position and moving speed of magnetic flux on the superconducting Nb foil should be understood. In this paper, we induced a theoretical equation for pumping current of LTMFP according to the position of normal spot and corresponding equivalent circuit. In addition, current charging tendencies under the intensity of magnetic flux and frequency were described based on the theoretical pumping equation.

Key Words: Linear type magnetic flux pump, Nb foil, Pumping mechanism, Theoretical pumping equation.

한 초전도 자석의 경우는 안정된 자속을 유지하기 위해 전류 보상기가 반드시 필요하다.

그와 같은 이유로 초전도 전원장치를 이용한 전류보상기의 개발은 HTS 선재를 이용한 자석 시스템 및 기초과학연구 분야에서 중요한 기술이다 [2]. 그와 같은 필요성으로 인하여 우리는 새로운 형태의 영구전류 전원장치(Linear Type Magnetic Flux Pump; LTMFP)를 제작하였고 실험적인 동작특성을 조사하였다[3]. LTMFP의 동작특성을 이해하기 위해서는 pumping 메커니즘의 이해가 반드시 필요하다.

이번 논문에서는 자속펌프(magnetic flux pump)에서 발생하는 충전 전류의 발생 순서를 초전도 Nb 박막에 침투하는 이동자속의 위치와 이동속도에 따른 pumping 메커니즘을 설명하기 위해 이론적인 충전 전류식을 유도하였다. 또한 유도된 전류 방정식을 이용하여 LTMFP의 충전전류의 경향을 이론적으로 설명하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 초전도 선재를 이용한 극고자장의 마그넷 개발은 활발한 연구를 진행하고 있다. 저온 초전도(LTS) 선재와 달리 고온 초전도(HTS) 선재의 경우 선재의 특성상 20 T 이상에서도 비교적 높은 임계 전류 밀도 J_c 를 유지하기 때문에 극고자장 마그넷을 구현하는데 중요한 해결책으로 제시되고 있다. 실제로 LTS 마그넷에 HTS 마그넷(BSCCO)을 삽입하는 방법으로 NMR 마그넷의 중심자장의 세기를 23.5 T (1 GHz) 이상의 극고자장의 실현하는 것이 실험적으로 가능해졌다 [1].

그러나, HTS 선재의 경우 선재의 본질적인 특성상 n value가 작기 때문에 영구전류모드(Persistent Current Mode) 상태에서는 영구전류감쇄가 LTS 선재와 비교하여 상당히 크다. 따라서 HTS 선재를 이용

2. 본 론

2.1. 리니어형 플럭스펌프의 구조 및 동작원리

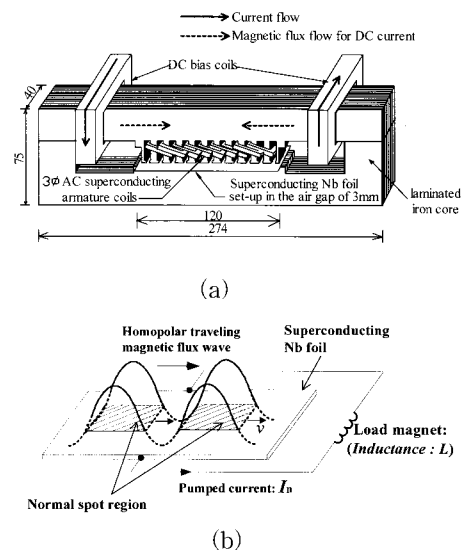


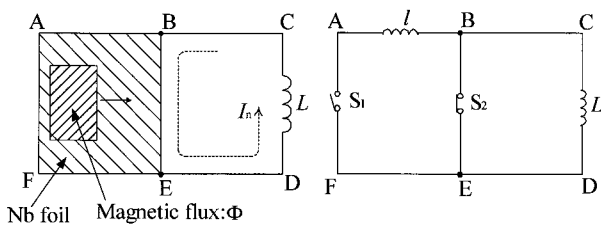
Fig. 1. Illustrations of the LTMFP system (unit: mm) (a) structure (b) schematic illustration of the homo-polar traveling magnetic flux wave on the superconducting Nb foil.

¹정 회 원 : 수원대학교 전기공학과
²정 회 원 : 안산공과대학 전기과
³정 회 원 : 국립 충청대학교 안전공학과
⁴정 회 원 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과
*교신저자 : ydchung@suwon.ac.kr
원고접수 : 2009년 02월 09일
심사완료 : 2009년 03월 17일
게재확정 : 2009년 03월 17일

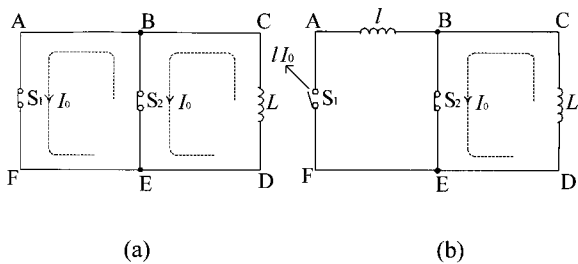
그림 1은 리니어형 초전도 전원장치(LTMFP)의 구성을 보여준다. LTMFP는 다음과 같은 4가지 성분으로 구성되어있다; 1. 적층된 철 코아, 2. 초전도 직류코일, 3. 초전도 교류코일, 4. 초전도 Nb 박막.

철 코아의 중심 슬롯에 감겨진 3상 초전도 코일은 정현파 형태의 자속 파형을 슬롯과 코아 사이의 공극(air gap)에 발생시킨다. 3상 전류에 의해 발생한 자속은 초전도 코일의 교류 전류에 의해 원점을 중심으로 +와 - 방향으로 시변하는 정현파이다. DC bias 전류에 의해 -방향의 정현파가 +방향으로 floating 되어 결국 그림1(b)와 같이 동극의 이동 교류 자속(homopolar traveling magnetic flux)이 공극에서 발생된다. 이 자속은 공극에 설치된 초전도 Nb 박막에 직접 인가되어 자속의 침투가 발생하는데 이 침투된 영역이 normal spot 이다. 그림 1 (b) 는 발생된 동극의 교류자속에 의해 발생된 normal spot을 보여준다. normal spot에 인가된 자장의 세기는 $\mu_0 H_{c1}$ 과 $\mu_0 H_{c2}$ 사이의 값을 가지므로 Nb 박막은 초전도의 혼합 상태를 유지하며, flux flow에 의한 에너지 감소가 발생한다. 교류 자속의 진행으로 인해 normal spot 영역은 이동하게 되는데 그때 초전도 Nb 박막은 초전도 상태에서 혼합 상태로 계속적인 상태의 전이가 발생하게 된다. 이때 normal spot 영역을 제외한 Nb 박막의 다른 영역은 초전도 상태를 유지하고 있으며 부하 코일과의 초전도 폐회로를 이루고 있다. Nb 박막을 포함한 초전도 폐회로에서 normal spot 영역의 이동될 때, 인가된 자장을 방해하는 방향으로 Nb 박막에 전류가 인가된다(Lenz의 법칙). 이러한 normal spot의 반복 이동으로 유도전류가 발생하고 이로 인하여 코일 전류가 증가하게 된다. 이 전류를 펌핑 전류라 하고 펌핑 전류는 폐회로를 통해 부하 코일에 충전된다. 이것이 초전도 자속펌프의 기본적인 동작원리이다.

2.2. 이동자속에 의한 자속침투의 위치에 따른 전류 펌핑 순서



(a) connection diagram (b) equivalent circuit
Fig. 2. Schematic diagram of the invasion of the normal spot.



(a) the normal spot is outside of the Nb foil (b) the normal spot is inside of the Nb foil
Fig. 3. Schematic diagram of the current pumping operation.

LTMFP의 pumping 메카니즘은 normal spot의 위치에 따라 설명할 수 있다. 그림 2 (a)는 이동자속이 Nb 박막에 침투하여 normal spot을 형성하고 이때 발생하는 pumping 전류의 흐름을 보여준다. 루프 ABEF는 Nb 박막을 내타내고 BCDE는 부하 마그넷을 나타낸다. 그림 2 (b)는 등가회로 연결도를 보여준다. normal spot의 위치에 따라 발생하는 저항 성분은 on-off 스위치로 표현할 수 있다. Nb 박막에 이동자속 침투로 인해 normal spot이 발생하고 침투된 영역은 초전도 상태에서 정상상태로 상태의 전이가 발생하면서 Nb 박막에 인덕턴스가 발생하는데 이를 자체 인덕턴스 l 라 한다. L 은 부하 마그넷의 인덕턴스이다. pumping 전류는 초전도 Nb 박막에서 이동 자속에 의해 발생한다. 인가된 pumping 전류(I_n)는 다음과 같이 표현된다[4].

$$\Delta I_n = \frac{\Phi}{L} \quad (1)$$

I_n 은 이동자속에 발생한 Φ 는 인가된 자속이다. 그림 3은 pumping 전류 동작에 관한 개념도이다. 만약 스위치 S_1 과 S_2 가 on 상태라면 (normal spot이 아직 Nb 박막에 아직 침투하지 않았음), 초기 전류(I_0)는 루프 ACDF를 통해 흐르며 BCDE루프를 통해 흐르는 전류와 같게 되며 그림 3(a)와 같다. 만약 스위치 S_1 이 open 되면 (이동자속이 Nb 박막에 침투하면) 이로 인해, 자속의 감쇄가 발생하는데 이 감쇄분은 발생된 전류와 Nb 박막의 자기 인덕턴스의 값으로 표현 된다 ($\Phi_0 = l \cdot I_0$). Nb 박막의 자기인덕턴스 값이 부하마그넷의 인덕턴스값에 비해 미소하여 펌핑 전류에 크게 영향을 미치지 못하며 스위치의 역할을 하게 된다. 그 개념도를 그림 3(b)와 같다. 따라서 영구전류 loop를 통과한 최종 펌핑 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta I_n = \frac{\Phi - l \cdot I_0}{L} \quad (2)$$

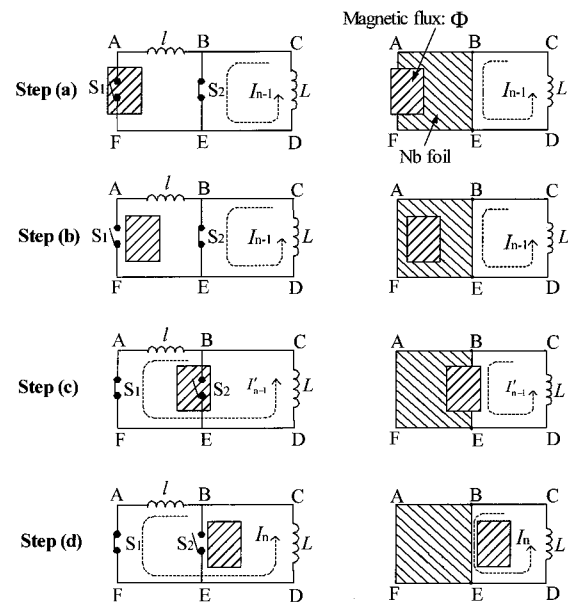


Fig. 4. Basic pumping sequences of the LTMFP according to the position of normal spot.

그림 4는 normal spot의 위치에 따른 기본적인 pumping 순서도를 보여준다. 각 순서에 따른 설명은 다음과 같다.

Step (a): 초기 전류 I_{n-1} 는 루프 BCDE를 통해 흐른다. 이동자속이 Nb 박막에 침투하기 시작하며 (S_1 :open) 이때 자속의 변화량은 $\Phi - l \cdot I_{n-1}$ 이 된다.

Step (b): 이동자속 Φ 는 Nb 박막위에 있고 초기전류 I_{n-1} 는 BCDE를 통해 흐른다. 이때 이동자속에 의해 발생된 침투영역이 초전도 상태로 전이 되는데 걸리는 지연시간 때문에 스위치 S_1 은 순간 open 되어 있다.

Step (c): Φ 는 Nb 박막을 벗어나기 시작하며 S_1 은 close 되어진다. 이때 유도된 전류 I'_{n-1} 은 S_2 가 open 되어 있으므로 루프 ACDF를 통해 흐른다. 은 다음과 같이 구해진다.

$$I'_{n-1} = \frac{L}{L+l} I_{n-1} \quad (3)$$

Step (d): Φ 는 Nb 박막을 벗어나기 시작할 때 이동자속에 의해 발생된 침투영역이 정상상태에서 초전도 상태로 전이 되는데 발생하는 지연시간이 발생하고 이 순간 스위치 S_2 는 이동자속의 침투영역이 Nb 박막을 빠져 나가도 침투영역이 정상상태에서 초전도 상태로 전이되는데 걸리는 시간만큼 open 되었다가 초전도 상태로 완전한 전이 후 close되는데 open 된 상태로 인한 자속의 변화량 $\Delta\Phi$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\Phi = \Phi - l \cdot I_{n-1} \quad (4)$$

유도된 펌핑 전류 I_n 은 ACDF를 통해 흐른다. 이와 같은 반복을 펌핑의 한 주기 (T)라고 할 때, 반복적인 이동자속의 침투에 의해 연속적인 펌핑 전류가 발생하게 된다. 따라서 이동자속의 침투위치가 한 주기가 진행된 후 각각의 Step (참조 Fig. 4)에서 유도된 펌핑 전류의 합과 같으며 한 주기 동안의 펌핑 전류의 값은 다음과 같다.

$$I_n = I'_{n-1} + \frac{\Delta\Phi}{L+l} \quad (5)$$

식 (3),(4)를 통해 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{L}{L+l} I_{n-1} + \frac{\Phi - l \cdot I_{n-1}}{L+l} \\ &= I_{n-1} + \frac{\Phi - 2l \cdot I_{n-1}}{L+l} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)을 일반화 시키면

$$I_n = \frac{\Phi}{L+l} \left\{ \sum_{k=1}^n \left(\frac{L-l}{L+l} \right)^{k-1} \right\} \quad (7)$$

결국 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$I_n = \frac{\Phi}{2l} \left\{ 1 - \left(\frac{L-l}{L+l} \right)^n \right\} \quad (8)$$

Table 1. Variations of the magnetic flux $\Delta\phi$ and the load current I_L with the switching condition for each step in LTMFP.

Step	S_1	S_2	$\Delta\Phi$	I_L
(a)	off	on	$\Phi - l \cdot I_{n-1}$	I_{n-1}
(b)	off	on	$\Phi - l \cdot I_{n-1}$	I_{n-1}
(c)	on	off	$\Phi - l \cdot I_{n-1}$	I'_{n-1}
(d)	on	off	$\Phi - l \cdot I_{n-1}$	I_n

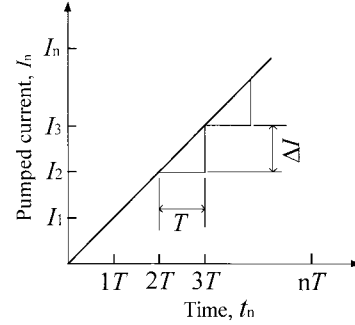


Fig. 5. Digitized diagram of pumped current I_n during operating period t_n .

Table 1은 그림 4의 이동자속의 위치에 따른 자속의 페루프를 형성하여 자속의 변화, 부하 마그넷에서의 충전된 전류의 값들을 나타낸다. 이동자속이 반복되면서 부하 마그넷에는 그림 5와 같이 회전 주기에 따른 pumping 전류가 충전된다. 펌핑 전류는 이동자속이 전류도 증가하게 된다. 따라서 임의의 주기 사이의 발생한 전류를 각각 (t_n, I_n) , (t_{n+1}, I_{n+1}) 라고 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I_{n+1} - I_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{\Delta I}{T} \quad (9)$$

반복적으로 Nb 박막에 진행될 때 이에 비례하여 펌핑 식 (6)과 식 (9)를 이용해 dI/dt 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{\Phi - 2l \cdot I(t)}{L+l} \frac{1}{T} \quad (10)$$

식 (10)을 정리하면 다음과 같다.

$$I(t) = \frac{\Phi}{2l} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2l}{T(L+l)} t_n\right) \right\} \quad (11)$$

동작시간 t_n 은 nT 이므로 식(11)로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$\exp\left(-\frac{2l}{T(L+l)} t_n\right) = \exp\left(-\frac{2l}{(L+l)} n\right) = \left(\exp\left(-\frac{2l}{L+l}\right) \right)^n \quad (12)$$

일반적으로 부하 마그넷 L 은 Nb 박막의 자기 인덕턴스 l 보다 매우 크므로 식 (12)에서 3번째

항부터의 값은 무시할 수 있다. 따라서 식 (12)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\left\{1 - \frac{1}{1} \left(\frac{2l}{L+l}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{2l}{L+l}\right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{2l}{L+l}\right)^3 + \dots\right\}^n = \left(\frac{L-l}{L+l}\right)^n \quad (13)$$

식 (12) 와 식 (13)의 관계로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$\exp\left(-\frac{2l}{T(L+l)}t_n\right) = \left(\frac{L-l}{L+l}\right)^n \quad (14)$$

이와 같은 관계로부터 식 (11)은 다음과 같이 표현된다.

$$I(t) = \frac{\Phi}{2l} \left\{1 - \exp\left(-\frac{2l}{T(L+l)}t_n\right)\right\} \quad (15)$$

식 (15)가 이동자속의 위치에 따라 발생한 pumping 전류를 나타내는 기본 방정식이다. 기본적으로 인가하는 자속의 세기에 비례하여 pumping 전류가 발생함을 알 수 있다.

2.3. LTMFP의 이론적인 펌핑전류 유도식

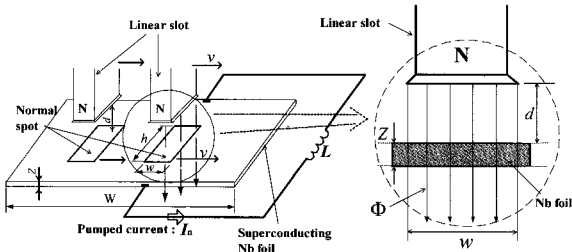


Fig. 6. Illustrations Schematic diagram of traveling normal spot on the superconducting Nb Foil in the LTMFP.

이동자속의 위치에 따른 펌핑 메커니즘을 통해 LTMFP 시스템에서 발생하는 pumping 전류에 관한 기본방정식을 유도 할 수 있다. 이 때 이동속도에 따른 LTMFP의 펌핑 메커니즘을 유도할 수 있다. LTMFP 시스템은 4 pole의 이동자속을 발생시키는 시스템이다. 그림 6은 이동자속이 초전도 Nb 박막에 자속이 침투되어 2개의 normal spot이 발생하는 개념도를 확대하여 나타내었다. 심볼 z, d, v, w, h, W 는 각각 Nb 박막의 두께, Nb 박막과 슬롯 사이의 간격, normal spot의 이동속도, normal spot의 길이, normal spot의 폭, Nb 박막의 전체 길이를 각각 나타낸다. Nb 박막에서 인가된 기전력의 크기는

$$\nabla E = ((-v) \times B) \cdot h \quad (16)$$

B는 Nb 박막에 수직으로 인가되는 자속밀도이며 이 때 normal spot 1 개에 의해 유도되는 전류 I_R 다음과 같다.

$$I_R = -\frac{B \cdot v \cdot h \cdot w}{R_n \cdot W} \quad (17)$$

이때 인가자속 $\Phi = B \cdot h \cdot w$ 와 pumping 주기 $T = W/v$ 의 관계가 성립하므로 식 (17)은 다음과 같이 표현된다.

$$I_R = \frac{\Phi}{R_n T} \quad (18)$$

이동자속에 의해 발생하는 전류 I_R 과 이동자속의 위치에 따른 자속의 변화 (식(4))에 따라 자속의 변화량은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\Phi = \left(\Phi - \frac{\Phi}{R_n T} l \cdot I_{n-1}\right) \quad (19)$$

LTMFP는 Nb 박막에 2개의 normal spot을 발생하므로 LTMFP의 Nb 박막에서의 자속의 변화량 $\Delta\Phi_{LTMFP}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\Phi_{LTMFP} = \left(2\Phi - \frac{2\Phi \cdot 2l}{2R_n T} - 2l \cdot I_{n-1}\right) \quad (20)$$

식 (5)의 관계를 통해 LTMFP의 pumping 전류 I_n 은 다음과 같다.

$$I_n = \frac{\Delta\Phi_{LTMFP}}{L+2l} + I'_{n-1} \quad (21)$$

이동자속의 위치에 따른 펌핑전류의 관한 식 (3)을 통해 I'_{n-1} 은 다음과 같다.

$$I'_{n-1} = \frac{L}{L+2l} I_{n-1} \quad (22)$$

식 (20)과 식 (22)을 이용하면 식 (21)은 다음과 같다

$$I_n = 2\Phi \left(1 - \frac{l}{R_n T}\right) \frac{1}{L+2l} + \frac{L-2l}{L+2l} I_{n-1} \quad (23)$$

식 (23)을 일반적으로 정리하여 보면

$$I_n = \frac{\Phi}{2l} \left(1 - \frac{l}{R_n T}\right) \left\{1 - \left(\frac{L-2l}{L+2l}\right)^n\right\} \quad (24)$$

따라서 식 (13)과 같은 방식으로 식 (24)를 정리하면 다음과 같다.

$$I(t) = \frac{\Phi}{2l} \left(1 - \frac{l}{R_n T}\right) \left[1 - \exp\left\{-\frac{4l}{T(L+2l)}t_n\right\}\right] \quad (25)$$

주파수 $f = 1/T$ 이므로 이동자속을 속도를 주파수로 표현하여 정리하면 다음과 같다.

$$I(t) = \frac{\Phi}{2l} \left(1 - \frac{fl}{R_n}\right) \left[1 - \exp\left\{-\frac{4fl}{L+2l}t_n\right\}\right] \quad (26)$$

결과적으로 이동자속의 속도를 고려한 LTMFP의 유도된 pumping 전류의 이론적인 방정식은 식 (26)과 같다. Nb 박막의 자기 인덕턴스 l , 이동자속에

의한 Nb 박막의 저항 R_n , 인가된 자속 ϕ 의 값은 다음과 같이 계산된다 [5]:

$$l = \mu_0 \times S_n / d$$

$$S_n = w \cdot h \quad : \text{area of normal spot.}$$

$$\mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$$

$$R_n = \rho \times h / z \times w, (\rho = 1 \times 10^{-8} \Omega m)$$

$$\phi = B \times S_n = B \times w \times h$$

2.4. LTMFP의 이론적인 전류충전 특성

pumping 메커니즘을 근거로 이동자속의 위치와 이동속도에 따라 유도된 충전전류 특성 방정식 (식 (26))에 의해 이론적으로 계산된 전류 충전 특성 경향은 다음과 같다.

그림 7은 인가자속의 이동속도가 일정할 때 인가된 자속의 세기가 증가할수록 발생하는 pumping 전류가

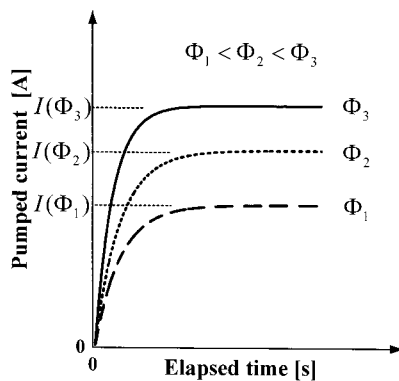


Fig. 7. Illustrations of theoretical pumping current for different magnetic fluxes.

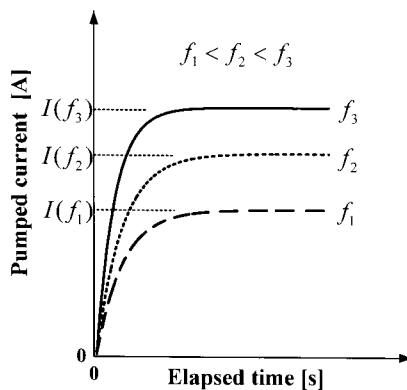


Fig. 8. Illustrations of theoretical pumping current for different driving frequencies.

증가함을 보여준다. 펌핑 전류와 인가된 자속의 크기의 관계를 비교하기 위해 Φ_1, Φ_2, Φ_3 은 인가된 자속의 크기를 임의로 나타내었다. 부하 마그넷에서 충전된 전류를 더 이상 저장하지 못하게 되면 포화된다. 그림 8은 인가된 자속의 세기가 일정할 때 인가된 AC 전류의 주파수가 (즉, 이동자속의 이동속도가) 증가하면 발생하는 pumping 전류가 증가함을 나타낸다. 충전 전류의 증가율이 급격히 감소되는 포화시점은 부하 마그넷의 인덕턴스 값에 의해 결정된다.

4. 결 론

이동자속의 위치에 따라 기본적인 자속펌프의 pumping 메커니즘을 이론적으로 이해할 수 있었다. 기본적인 pumping 메커니즘을 근거로 이동자속의 속도에 따른 LTMFP의 pumping 특성을 이론적으로 유도하였다. 결과적으로 이동자속의 위치와 이동속도에 따라 유도된 LTMFP의 충전 전류 특성방정식(식 (26))을 통해 이론적인 전류 특성을 통해 고찰하였다. 계속된 연구를 통해 LTMFP의 실험적인 충전전류의 결과를 유도된 이론적 특성방정식(식 (26))을 이용하여 동작특성을 설명하여 유도된 특성방정식의 유용성을 입증하려 한다.

감사의 글

본 연구에 여러 도움을 주셨던 Itsuya Muta 교토대학교 명예교수님께 감사를 드립니다. 본 연구는 일본 문부성과 21세기 COE 프로그램의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kiyoshi, A. Sato, H. Wada, S. Hayashi, M. Shimada and Y. Kawate, "Development of 1 GHz superconducting NMR magnet at TML/NRIM," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 559-562, June 1999.
- [2] H.G. Lee, H.M. Kim and Y. Iwasa, "A flux pump for an NMR magnets," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1640-1643, June 2003.
- [3] Y.D. Chung, I. Muta, T. Hoshino, T. Nakamura and M.H. Sohn, "Design and performance of compensator for decremental persistent current in HTS magnets using linear type magnetic flux pump," Cryogenics, vol. 44, no. 11, pp. 839-844, Nov. 2004.
- [4] J.V. Suchtelen, "The principle and performance of a superconducting dynamo," Cryogenics, vol. 5, no. 10, pp. 256-266, 1965.
- [5] H. Tsukiji, T. Hoshino and I. Muta, "Characteristics of exciting superconducting magnet by magnet flux pump," Transactions of IEE of Japan, vol. 116-D, no. 2, pp. 183-190, Feb. 1996.

저 자 소 개



정윤도(鄭允道)

1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 겸임교수.



배덕권(裵德權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 2005.9-2006.8 한국기계연구원 선임연구원, 2006.10-현재 충주대학교 안전공학과 조교수.



윤용수(尹庸銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985~1998년 대우전자(주)개발팀장, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University(공학석사), 1986년 동 대학원 (공학박사), 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.