

리니어형 자속펌프의 이동자장 속도에 따른 충전전류 특성 해석

Analysis of Charging Characteristics of Linear Type Magnetic Flux Pump Depended on Traveling Speed of Magnetic Field

정윤도^{1,*}, 김현기², 배덕권³, 윤용수⁴, 조현철⁵, 고태국⁶

Yoon Do Chung^{1,*}, Hyun Ki Kim², Duck Kweon Bae³, Yong Soo Yoon⁴,
Hyun Chul Jo⁵, Tae Kuk Ko⁶

Abstract: We already obtained magnetic behavior of superconducting Nb foil of linear type magnetic flux pump (LTMFP) by means of the FEM analysis. As well as, fundamental equations of pumping current were theoretically derived based on the pumping sequences according to the position of normal spot of the moving flux. In this paper, we experimentally investigated pumping performances of LTMFP with a wide range of traveling speed of magnetic field. In order to confirm the numerical and theoretical approaches, we explained the pumping characteristics of LTMFP by use of the calculation sequence of pumping current.

Key Words: linear type magnetic flux pump, superconductor, pumping current, traveling speed of magnetic field.

1. 서 론

임계전류 특성이 우수한 고온초전도 선재를 저온초전도 마그넷에 삽입하여 고자장 (23.5T 이상)이 가능한 하이브리드(hybrid) 마그넷 기술이 개발되어 그 기술을 자기공명 영상장치(MRI), 핵자기공명장치(NMR) 분야에 적용하기 위해 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 고온 초전도선재의 경우 본질적으로 영구전류상태에서 전류감쇄가 크게 발생하기 때문에 초전도 마그넷 시스템의 안정도를 저하시킨다. 따라서 초전도 마그넷의 안정도를 유지하기 위해서는 초전도 전원장치가 반드시 필요하다 [1-2].

그와 같은 필요성으로 인해 우리는 새로운 형태의 초전도 전원장치인 리니어형 자속 펌프(linear type magnetic flux pump: LTMFP)를 개발하였고 전류 보상기로서의 다양한 동작 특성을 조사하였다 [3-4].

LTMFP 시스템의 초전도 니오븀(Nb) 박막으로 침투하는 이동자계의 위치와 이동속도에 따른 충전 메커니즘을 설명하기 위해 이론적인 충전 전류식(theoretical pumping equation)을 유도하여 충전전류의 경향을 이론적으로 설명하였다 [5]. 특히, 이동자계(traveling field)의 이동속도에 따른 초전도 니오븀 박막에 침투되는 영역(normal spot region)을 FEM 시뮬레이션을 통해 수치적으로 계산하였고, 이를 근거로 자계확산 현상(phenomenon of magnetic diffusion)의 발생을 확인하였다. 또한 초전도 니오븀 박막에서 인가자속에 의한 침투영역의 비선형적인 크기변화를 FEM 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다 [6].

본 연구에서는 LTMFP의 이동자계의 이동속도와 충전전류와의 관계를 실험적으로 확인하였다. 특히, 이동자속의 속도가 20 Hz 이상에서 충전전류증가율이 서서히 감소하게 되는 비선형적인 충전 전류특성 결과를 확인하였다. 따라서 본문에서는 LTMFP의 비선형적인 충전전류의 해석을 위해 이론적인 충전전류식과 자계확산의 현상을 이용하여 설명하였다.

2. 본 론

2.1. 리니어형 자속펌프의 구조 및 동작원리

그림 1은 개발된 리니어형 초전도 전원장치의 구조이다. LTMFP는 다음과 같은 4가지 성분으로 구성되어 있다. 적층된 철 코어, 초전도 직류코일, 초전도 교류코일, 초전도 니오븀 박막.

철 코어의 중심 슬롯에 감겨진 초전도 3상 교류는 공극(air gap)에서 이동 자속(traveling magnetic field)을 발생한다. 3상 전류에 의해 발생된 이동자속은 공극에 설치된 초전도 니오븀 박막에 인가된다. 이때 충전전류를 발생시키기 위해서는 이동자속을 양의 방향

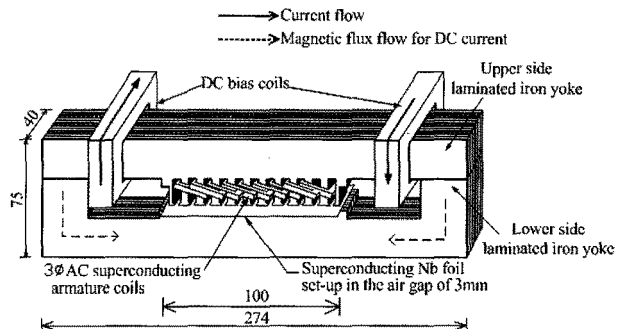


Fig. 1. Structure of the LTMFP (unit: mm).

¹정 회 원 : 수원대학교 전기공학과 연구교수
²비 회 원 : 수원대학교 전기공학과 교수
³정 회 원 : 국립 충청대학교 안전공학과 조교수
⁴정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수
⁵학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
⁶정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
*교신저자 : ydchung@suwon.ac.kr
원고접수 : 2010년 02월 03일
심사완료 : 2010년 03월 10일
게재확정 : 2010년 03월 10일

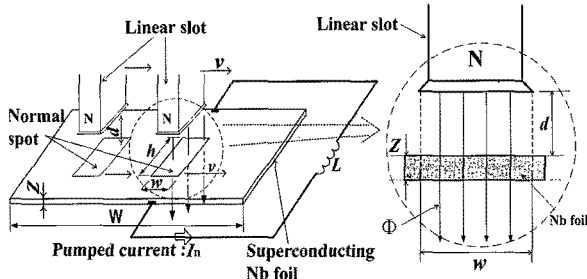


Fig. 2. Schematic diagram of the invasion of the normal spot in the Nb foil.

(positive)으로 이동시켜 동극의 이동자계(homopolar traveling magnetic field)의 발생이 반드시 필요하다. 교류 전류에 의하여 발생한 이동자계는 DC 전류로 발생한 자속은 밑쪽 슬롯(lower side yoke)의 중심으로 인가되어 (그림 1참조) 이동자계를 양의 방향으로 이동시켜 동극의 이동자계가 형성된다. 발생된 동극의 이동자계는 공극에 설치된 초전도 니오븀 박막에 인가되어 충전전류를 발생시킨다. DC코일에 의한 자속이 중심으로 인가되도록 코일을 서로 반대 방향으로 감아 설치한다. 따라서 DC 와 AC 코일에 전류를 인가하여 동극의 이동자계를 효과적으로 발생시키게 된다. 니오븀 박막에 인가된 동극의 이동자계의 최대 피크값은 니오븀 박막의 혼합상태($\mu_0 H_{c1} < B < \mu_0 H_{c2}$)의 범위를 유지해야한다. 동극의 이동자계의 피크값은 DC 와 AC 전류의 크기로 조절이 가능하다. 충전전류 증가는 3상 교류 전류의 주파수 f 에 의해 쉽게 제어가능하다. 발생된 동극의 이동자계가 박막에 침투되어 충전전류를 발생시키면 충전전류는 그림 2와 같이 부하 마그넷에 충전된다. 그림 2는 공극에서의 이동자계에 의한 침투영역을 확대한 것이다. d 는 슬롯과 니오븀 박막 사이의 거리, h 와 w 는 노멀스팟(normal spot)의 폭과 길이, Z 와 W 는 Nb 박막의 두께와 전체길이, v 는 노멀스팟의 이동속도, Φ 는 인가 자속을 나타낸다.

2.2. LTMFP의 충전전류 이론식

LTMFP의 충전전류 메커니즘은 이동자계가 침투된 영역 위치(position of normal spot region)에 따라 설명할 수 있다. 그림 3과 같이 침투된 영역에서 발생한 저항 성분은 on-off 스위치(S_1, S_2)로 설명될 수 있다. I_n 는 충전전류, L 은 부하인덕턴스, l 은 니오븀 박막의 자기인덕턴스를 나타낸다. 그림 3 (b)는 등가회로 연결도를 보여준다. 따라서 침투영역의 위치에 따라 충전전류의 흐름이 영향을 받게 된다. 위와 같은 메커니즘을 통해 LTMFP 시스템의 충전 유도식은 이미 상세히 설명되었고 결국, LTMFP 시스템에서 이동자계가 침투된 영역의 위치와 이동 속도를 고려한 충전식은 식 (1)과 같이 유도되었다 [5]. 또한 노멀스팟의 영역 S_n ,

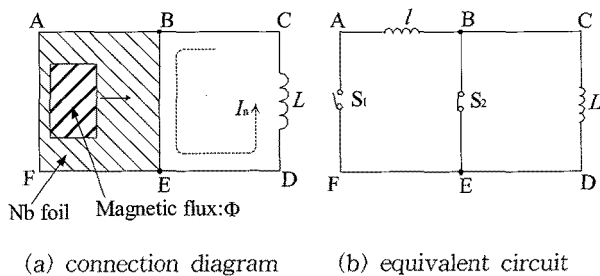


Fig. 3. Schematic diagram of the invasion of the normal spot.

침투된 이동자계에 의한 니오븀 박막의 투자율 및 저항은 μ_0 와 R_n , 인가된 자속 Φ 의 계산은 식(2)~(5)와 같다 [5].

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

$$l = \mu_0 \times S_n / d, \quad S_n = w \times h \quad (2)$$

$$\mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}) \quad \phi = B \times S_n = B \times w \times h \quad (3)$$

$$R_n = \rho \times h / z \times w, \quad (\rho = 1 \times 10^{-8} \Omega m) \quad (4)$$

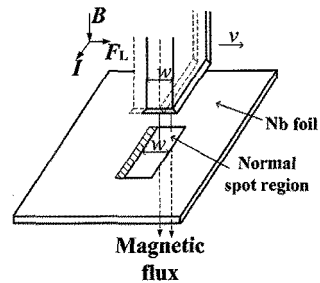


Fig. 4. Schematic diagram of phenomenon of magnetic diffusion.

2.3. 이동자계의 침투에 의한 자계확산

LTMFP의 충전전류 특성을 나타내는 식 (1)은 침투 영역의 크기가 불변한다는 가정에서 유도되었다. 충전 특성을 나타내는 식 (1)을 이용 이동자계의 저속이동 (20 Hz 미만)에서의 충전식은 효과적으로 설명할 수 있다. 그러나 이동자계의 고속이동(20 Hz 이상)의 경우는 효과적 설명이 어렵다. 따라서 우리는 이동자계의 침투에 의한 자계확산의 현상을 기반으로 LTMFP 충전특성을 이론적으로 설명하였다 [6].

시변 하는 자장 B 가 초전도체에 인가될 때, 침투된 자속은 다음과 같은 관계를 가지고 확산하게 된다.

$$D_m \nabla^2 B = \partial B / \partial t \quad (5)$$

D_m 은 자기 확산율(magnetic diffusivity)이라 하며 ($= \rho / \mu_0$; ρ :침투자계에 의한 초전도 니오븀박막의 저항값(resistivity), μ_0 :진공 중에서의 투자율) 이다 [7]. 그림 4는 인가자속이 초전도체에 침투하며 이동할 때 침투면적이 확산되는 것을 간략하게 보여주고 있다. 초전

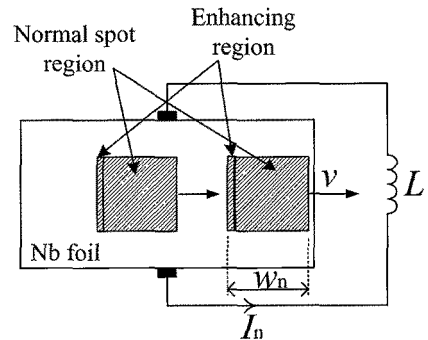


Fig. 5. Schematic diagram of phenomenon of magnetic diffusion in the LTMFP.

도체에 전류가 흐르는 방향과 수직으로 이동자속이 인가될 때 전류의 방향의 수직 오른쪽으로 발생하는 로렌즈 힘 F_L 이 발생하며 F_L 은 자장이 침투되어 양자화된 플럭소이드(fluxoid)에 가해진다. 만약 인가되는 이동자속이 크기가 일정하고 F_L 에 의해 이동하는 플럭소이드보다 빠르게 이동하게 되면, 침투된 부분이 점점 넓어져 확산이 발생한다. 결국 이동자계의 세기가 일정할 때, 이동속도가 자기확산에 영향을 미치게 된다.

그림 5는 자기확산 현상을 LTMFP에 적용하여 이동자장이 침투되는 노멀스팟 영역의 확산을 보여준다. LTMFP는 공극에서 4극 이동자계를 발생시키므로 이동자계가 침투되는 노멀스팟 영역은 2개가 발생한다. 이때 침투자계의 인가주파수가 빠르게 진행될 때 침투 영역의 확산이 발생하여 두 노멀스팟 사이의 간격은 좁아지게 된다. w_n 은 자계확산에 의해 확산된 노말스팟영역의 길이를 나타낸다. 따라서 확산된 침투영역의 길이는 다음과 같이 식 (6)과 같이 표현될 수 있다. w_0 는 확산이 이루어지지 않은 침투영역의 길이의 초기값, k 는 침투영역 길이의 증가율, f 는 3상 교류전류 주파수를 각각 나타낸다.

$$w_n(f) = w_0 + kf = \alpha \quad (6)$$

자기확산의 이론적 설명과 침투영역 확산율은 3D FEM을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 또한, 이동자계의 속도와 자계확산율의 관계를 수치적으로 계산하였다. 결국, 이동자계의 속도가 약 20 Hz이상에서 급격히 발생하는 것을 수치적으로 확인하였다. 21.5 Hz 미만에서는 증가율 k 가 0.095 mm/Hz, 21.5 Hz 이상에서는 0.324mm/Hz임이 각각 수치적으로 계산되었다 [6].이 때 시뮬레이션에서의 조건은 이동자계가 니오븀 박막에 수직하게 인가될 때의 손실만을 고려했다. 또한 AC 손실(loss)에 의한 니오븀 박막에서의 손실은 고려하지 않았다.

본 연구에서 다양한 주파수의 범위(이동자계의 이동 속도)에서 LTMFP의 충전전류를 이론적으로 계산하기 위하여 식(1)과 (6)을 이용하였다. 20 Hz이상에서의 충전전류증가율의 감소는 자계확산현상으로 인한 침투영역의 증가율 k 를 이용하여 충전전류를 계산한다. 다시 말해서 침투영역의 증가로 인해 니오븀 박막의 저항 R 이 증가하기 때문에 니오븀 박막에서의 손실이 발생하며 그 결과 충전전류가 서서히 감소하게 된다.

2.4. 자계확산현상을 고려한 충전전류의 계산

LTMFP는 이동자계의 속도(AC 전류 주파수)에 대해 비선형적인 충전특성을 갖고 있다. 이와 같은 특성을 효과적으로 설명하기 위해 자계확산현상을 적용하여 설명하였다.

다양한 주파수의 범위에서 LTMFP의 충전전류를 계산하기 위해 식(1)~(4)와 식(6)을 사용하여 계산하였고, 그 계산 과정은 그림 6과 같다. 과정 1: 실험을 통해 얻은 공극에서의 이동자계의 분포를 이용하여 초기 침투영역의 면적 S_0 을 근사적으로 계산한다. 과정 2: 계산된 S_0 의 면적과 식 (1)~(4)을 이용하여 충전전류를 예측한다. 과정 3: 실험을 통해 측정된 충전전류를 과정 2를 통해 예측된 계산 값과 비교를 통해 k 값을 예측한다. 과정 4: 예측된 k 값을 통해 얻은 확장된 침투영역의 면적을 이용(식 (6))하여 충전전류 값을 최종적으로 계산한다. 실제 실험적으로 자계확산의 현상을 직접 측정하기는 어렵기 때문에, 위와 같은 방법을 통해 간접적인 자계확산율을 예측하였다.

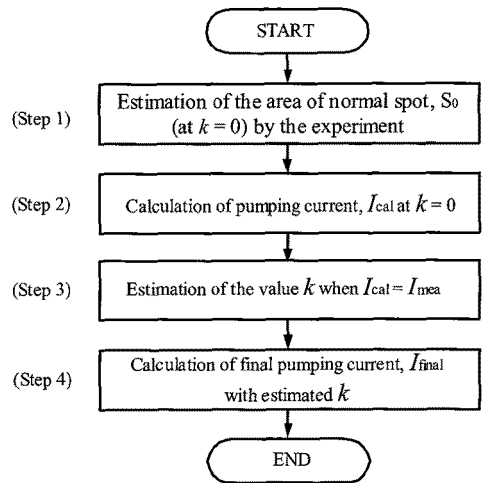


Fig. 6. Flow chart of calculation sequences for pumping current.

3. 실험과정 및 결과

LTMFP의 충전전류측정을 위해 2개의 홀센서를 공극과 부하 마그넷에 각각 설치하였다. 또한 LTMFP의 니오븀 박막과 543 mH의 부하마그넷을 연결하여 영구전류모드 상태를 유지하였다, LTMFP에서 3상 교류전류의 주파수변화를 쉽게 하기위해 3상 PWM 인버터를 그림 7과 같이 연결하였고, 고조파제거를 위해 3상 리액터를 통해 교류코일에 전류를 공급하였다.

그림 8은 공극에서의 이동자계의 분포를 측정된 결과이다. 전류조건은 DC 10 A, AC 6 A_{peak}, 7 Hz이다. 이동자계의 최대 값은 200 mT, 최소 값은 -20 mT이다. 인가된 이동자계에 의해 니오븀 박막에 침투된 영역의 계산을 명확하게 측정하기는 어려움이 있어 실험 결과 근거로 근사적으로 계산하였다. 니오븀 박막의 $\mu_0 H_{cl}$ 은 약 100~160 mT정도이다 [8]. 따라서 100 mT 이상의 자계의 세기 영역에서 침투영역이 발생한다고 할 때 침투영역의 길이는 w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 의 각각의 이동속도를 이용하여 구할 수 있다. $w_1 \sim w_5$ 의 평균 이동 시간은 69.6 ms이다. 니오븀 박막의 전체 길이는 120 mm이므로 길이에 대한 속도의 비례관계를 통해

$$w_0 = \frac{120mm}{285ms} \times 69.6ms = 29.3mm \quad (7)$$

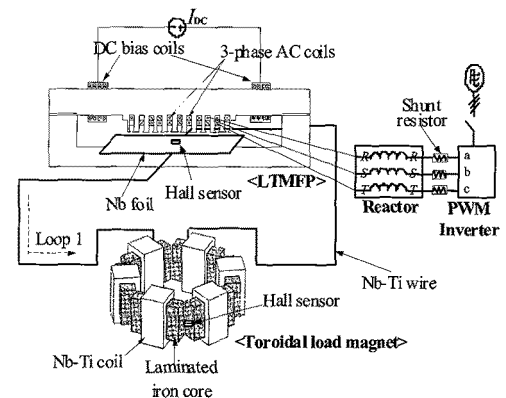


Fig. 7. Connection diagram of setup of the assembled LTMFP system.

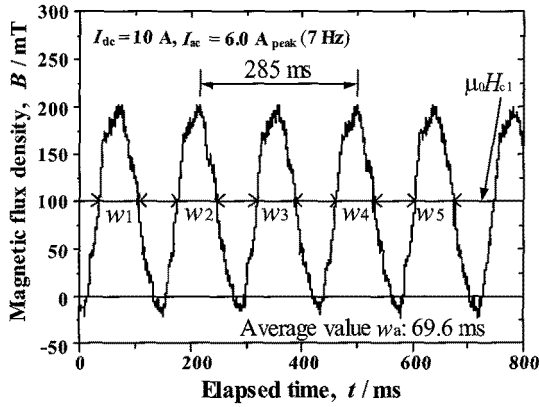


Fig. 8. Experimental results of the traveling magnetic field at the air gap.

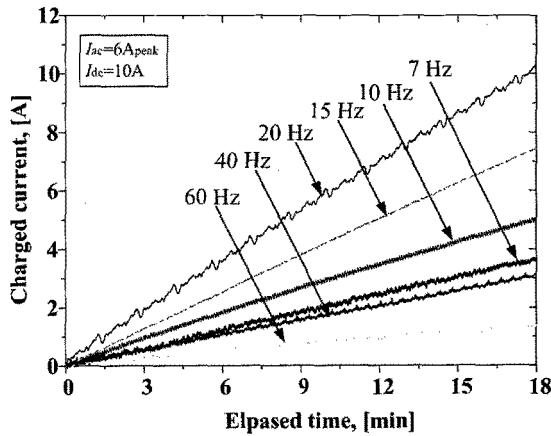


Fig. 9. Experimental results of charging current of the LTMFP.

Table 1. Measured results of pumping current rate for driving frequency with DC 10 A and AC 6 A_{peak}.

<i>L</i> (mH)	<i>I</i> _{dc} (A)	<i>I</i> _{ac} (A _{peak})	<i>f</i> (Hz)	<i>C</i> _{pr} (mA/s)
543	10	6	7	3.4
			8	3.9
			9	4.2
			10	4.7
			12.5	5.8
			15	6.9
			17.5	8.3
			20	9.5
			25	8.4
			30	7.5
			35	6.2
			40	4.7
50	2.8			
60	1.2			

침투영역의 평균길이의 초기 값을 다음과 같이 계산할 수 있다.

침투영역의 폭은 LTMFP의 폭과 같이 40 mm (그

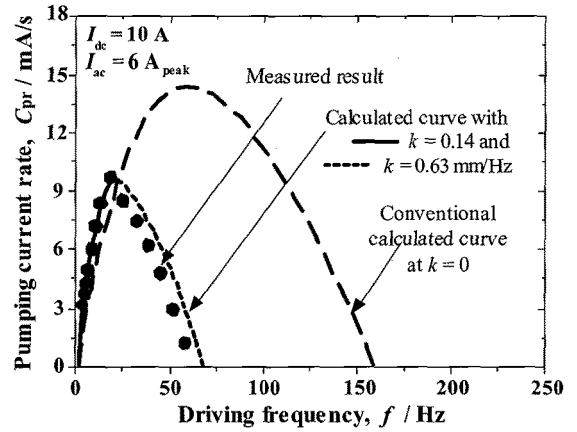


Fig. 10. Experimental and calculation results of charging current of the LTMFP.

림 1 참조)이다. 따라서 그림 8과 같은 전류조건에서 침투영역의 넓이는 29.3 mm×40 mm= 1172 mm² 가 된다.

그림 9는 그림 8의 전류조건의 다양한 주파수에서 측정된 충전전류를 보여준다. 주파수는 각각 7, 10, 15, 20, 40, 60 Hz이다. 충전시간은 18 분이다. 20 Hz미만에서의 충전전류는 주파수에 비례하여 증가하지만, 20 Hz이상에서는 주파수가 증가함에 따라 충전전류 증가율이 감소함을 실험을 통해 확인하였다. 주파수에 따른 충전전류율의 실험적인 결과는 표 1에 나타났다.

그림 10은 주파수에 따른 충전 전류증가율의 측정값과 계산 값을 각각 나타낸다. 측정결과는 20 Hz미만에서는 증가하다가 20 Hz 이상에서 감소하는 것을 보여준다. 계산결과의 경우 k=0 일 때, 즉 니오븀 박막에서 침투영역이 변화가 없는 조건에서 식(1)~(4)를 이용한 충전전류의 계산 값을 나타낸다. 이 경우 75 Hz 이상에서 충전 전류의 감쇄가 시작되는 비선형적인 충전전류 특성을 갖는다. 이 결과는 실제적인 충전전류의 측정결과를 효과적으로 설명하기 어렵다. 따라서 자계확산 현상을 고려한 충전전류 식(1)~(4), 식(6) 그리고 그림 6의 충전전류 계산과정을 이용하여 k값을 예측하였다. 즉 20 Hz 미만에서 k=0.14 mm/Hz, 20 Hz 이상에서는 k=0.63 mm/Hz의 계산결과는 비선형적인 충전전류 특성을 효과적으로 설명하였으며, 이는 FEM을 이용한 자계확산 현상과 자계 확산을 k 값의 수치적 계산 값과도 상당히 일치하는 결과이다. 차이점이 발생했던 주된 이유는 시뮬레이션의 경우 AC 손실이 고려되지 않았고 또한 실제 실험의 경우 니오븀 박막과 NbTi초전도 선재와의 접촉저항에 의한 손실부분이 있으나, FEM에서는 그와 같은 부분이 고려되지 않았기 때문이다.

4. 결 론

본 연구는 초전도 전원장치인 LTMFP시스템의 충전 전류의 비선형적인 충전특성을 설명하기위해 이론적인 충전전류 유도식과 이동자계침투에 의한 자계확산의 현상을 기반으로 주파수에 따른 비선형적인 충전특성을 이론적으로 계산한 결과에 대해 실험결과와 비교하였다. 이와 같은 결과를 근거로 실험적으로 측정하기 어려운 자계확산율을 간접적인 예측을 할 수 있었다. 이와 같은 계산과정을 통해 얻은 예측결과 즉, 자기침

투에 의한 확산을 k 은 기존에 FEM을 통해 얻은 시뮬레이션 결과와도 상당히 일치하는 결과이기 때문에, 신뢰할 수 있는 접근 방법으로 고려될 수 있다. 결과적으로, 이와 같은 자기침투에 의한 자기확산현상을 이용한 충전전류에 관한 이론적인 접근은 초전도 자속펌프 시스템의 충전특성을 이해하는데 의미 있는 접근 방법중의 하나로 고려 될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원[NRF-2009-353-D00035]과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(MEST 2009-0085369)을 받아 수행된 연구임

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, 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, 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, 2004.
- [4] Y.D. Chung, T. Hoshino, T. Nakamura, "Current pumping performance of linear type magnetic flux pump with use of feedback control circuit system," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 1638-1641, 2006.
- [5] 정윤도, 배덕권, 윤용수, 고태국, "침투자속의 위치와 이동속도에 따른 리니어형 자속펌프 충전전류의 이론적 해석," 한국초전도 저온공학회논문지, vol. 11, no. 1, pp. 39-44, 2009.
- [6] 이웅로, 정윤도, 배덕권, 윤용수, 고태국, "시뮬레이션을 이용한 리니어형 자속 플럭스 펌프에서의 초전도 니오븀 박막의 자장분포 해석," 한국초전도 저온공학회논문지, vol. 11, no. 3, pp. 49-54, 2009.
- [7] Martin W. Wilson, "Superconducting Magnet," Clarendon Press-Oxford, 1983.
- [8] P. Penczynski, H. Hentzelt and G. Eger, "Measurement of the temperature dependence of the 50 Hz alternating current losses of superconducting stabilized niobium conductors," Cryogenics, vol.14, pp. 503-509, 1974.

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 연구교수.



김현기(金賢起)

1955년 2월 26일생, 1977년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1991년 동 대학원 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 교수, 산학협력단장, (사)한국산학연합회 회장, 국가과학기술위원회 정책전문위원.



배덕권(裴德權)

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.



조현철(趙賢哲)

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사 과정.



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.