

시뮬레이션을 이용한 리니어형 자속 플럭스 펌프에서의 초전도 니오븀 박막의 자장분포 해석

Magnetic Field Distribution Analysis of Superconducting Niobium Foil of Linear Type Magnetic Flux Pump using Simulation

이응로¹, 정윤도^{2,*}, 배덕권³, 윤용수⁴, 고태국⁵

Eung Ro Lee¹, Yoon Do Chung^{2,*}, Duck Kweon Bae³, Yong Soo Yoon⁴, Tae Kuk Ko⁵

Abstract: We investigated an operating characteristic of linear-type magnetic flux pump (LTMFP) as a current compensator under the various conditions. In order to explain the mechanism of the LTMFP, the magnetic behavior of superconducting Nb foil according to pumping actions should be understood. In this paper, the magnetic field analysis of superconducting Nb foil installed in LTMFP has been performed based on the three-dimensional finite element method (3D FEM). Through the simulation analysis, the normal spot region on the superconducting Nb foil is found to be enhanced swiftly over about 20 Hz. The simulated finding agreed with an analytical estimation based on the phenomenon of magnetic diffusion.

Key Words: Linear type magnetic flux pump, Normal spot region, Phenomenon of magnetic diffusion, 3D FEM.

1. 서 론

비교적 높은 임계전류 밀도 J_c 를 유지하는 고온 초전도 선재를 이용한 초고자장 마그넷(20 T 이상)의 개발이 가능해짐에 따라 기초과학, 의료, 운송, 에너지 저장과 같은 산업에 초고자장 마그넷을 이용한 광범위한 연구 및 개발이 진행되고 있다. 특히, 기존의 저온 선재 마그넷에 고온 선재 마그넷을 삽입하는 방식으로 초고자장(23.5 T 이상)을 발생시킬 수 있도록 하는 NMR용 하이브리드(Hybrid) 마그넷에 대해 다양한 기초적 연구가 진행되고 있다[1].

그러나, HTS 선재의 경우 선재의 본질적인 특성상 n 값이 작기 때문에 영구전류모드(Persistent Current Mode) 상태에서는 영구전류감쇠가 LTS 선재와 비교하여 상당히 크다. 따라서 HTS 선재를 이용한 초전도

자석의 경우는 안정된 자속을 유지하기 위해 전원장치가 필요하며 외부의 별도 전원장치로 부터의 전류공급을 하게 되면 열손실이 크게 발생한다. 또한 전체적인 시스템의 안정성을 향상시키기 위해 초전도 전원장치를 시스템 내부에 설치하여 전체적인 시스템의 안정성도 향상시킬 수 있다[2]. 그와 같은 필요성으로 인해, 우리는 새로운 형태의 전원장치인 리니어형 자속 플럭스 펌프(Linear Type Magnetic Flux Pump; LTMFP)를 제작하였고 실험적인 동작특성을 조사하였다. 개발된 리니어형 초전도 전류 보상기는 다양한 동작조건에서 충전 전류 실험을 통해 검증되었고, 고자장 초전도 마그넷용 전류보상기로 적용하기 위한 기본적인 특성 조사를 수행하였다. 충전전류는 초전도 Nb 박막에 인가되는 자장의 크기와 이동속도(주파수)에 영향을 받아 발생됨이 실험적으로 이미 확인되었다[3-4]. 3상인 버터의 인가 주파수가 임계점 이상 (20 Hz 이상)에서 충전전류가 진동하면서 충전전류가 서서히 감소하는 비선형적인 충전특성이 조사되었다.

본 논문에서는 인가주파수에 따른 비선형적인 충전특성을 해석하기 위해 초전도 Nb 박막에 인가되는 자속이 이동속도에 따라 침투영역의 확산을 시뮬레이션을 통해 수행하였다, 즉, 초전도 Nb 박막에 인가자장을 침투시킬 때 자계확산 현상(phenomenon of magnetic diffusion)이 발생하는 것을 수치적으로 확인하였고 자기확산 현상의 이론적인 특성방정식을 통해 얻은 결과 값과 일치하는 것을 확인하였다. 결과적으로 Nb 박막에서 인가자속에 의한 침투영역의 비선형적인 크기 변화를 확인하였다.

2. 본 론

2.1. 리니어형 플럭스 펌프의 동작원리 및 구조

리니어형 초전도 전원장치의 원리는 그림 1과 같다. 두께 $20\mu\text{m}$ 초전도 Nb 박막을 NbTi 초전도 마그넷과 연결하고 액체 헬륨(4.2 K)으로 냉각시켜 초전도 페루프(close loop)를 형성한 후 자석을 그림 1과 같이 이동시키면서 인가시킨다. 영구자석의 이동으로 자속이 Nb 박막에 침투하게 되며 이때 침투된 영역을 노멀 스폿(normal spot) 이라 한다.

침투된 영역은 Nb 박막의 혼합상태($\mu_0 H_{c1} < B < \mu_0 H_{c2}$)를 유지한다. 노멀 스폿 영역을 제외한 부분은 초전도 상태를 유지한다. 영구자석에 의해 노멀 스폿영역이 Nb 박막을 통과할 때 (그림 1 (b), (c)), 영구전류 모드에서 충전전류 I_s 가 발생하며 I_s 는 에너지 손실 없이 NbTi 마그넷에 충전된다. 즉, 자속 Φ 의 반복적인 이동으로 전류가 발생하며 이를 전류 펌핑 (current

¹학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

²정 회 원 : 수원대학교 산업기술연구소 연구교수

³정 회 원 : 국립 충청대학교 안전공학과 조교수

⁴정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수

⁵정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

*교신저자 : ydchung@suwon.ac.kr

원고접수 : 2009년 08월 04일

심사완료 : 2009년 09월 14일

게재확정 : 2009년 09월 14일

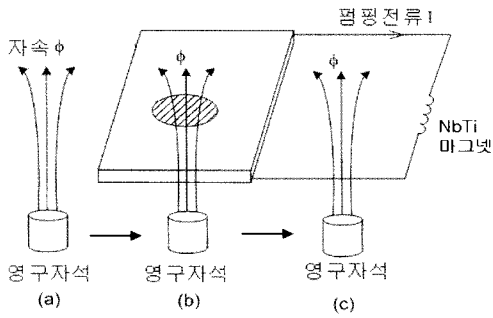
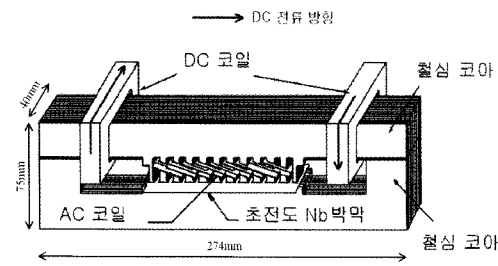
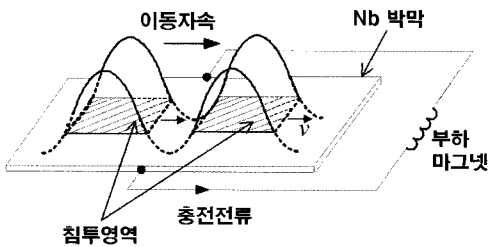


Fig. 1. Basic principle of linear type magnetic flux pump. By moving the magnet from (a) to (c), the current I_s increases because the magnetic fluxes Φ are pumped in the superconducting loop.



(a) 구조.



(b) 공극에서의 자속 분포.

Fig. 2. Illustrations of the LTMFP system (unit: mm) (a) structure (b) schematic illustration of the homopolar traveling magnetic flux wave on the superconducting Nb foil.

pumping)이라 한다. 리니어형 플럭스 펌프는 발생된 I_s 를 이용한 초전도 마그넷용 전류보상 시스템이다.

그림 2(a)는 개발된 리니어형 초전도 전원장치의 구조이다. LTMFP의 철 코어의 중심 슬롯에 감겨진 3상 교류 초전도 코일은 교류의 자속 파형을 슬롯과 코어 사이의 공극(air gap)에서 발생된다. 1쌍의 DC 코일을 설치하고 발생된 교류자장을 양(positive)방향으로 바이어스 시키는 역할을 한다. 따라서 교류 초전도 코일의 전류에 의해 발생된 교류 자속은 DC 코일에 의해 자속의 양의 방향으로 이동되어져 결국 동극의 이동 교류 자속(homopolar traveling magnetic flux)이 공극에서 발생된다. 리니어 철심 코어는 리니어 유도 모터의 구조와 흡사하다. 교류 3상 코일을 중앙 슬롯에 감아 전류를 흘리면 공극에서 이동자속이 발생한다. 공극에 Nb 박막을 설치하면 발생된 이동자속이 박막에 침투되어 충전전류를 발생시키며 충전전류는 그림 2(b)에서 보이듯이 부하 마그넷에 충전된다.

2.2. 시변자장의 침투에 의한 초전도체의 자기 확산 현상

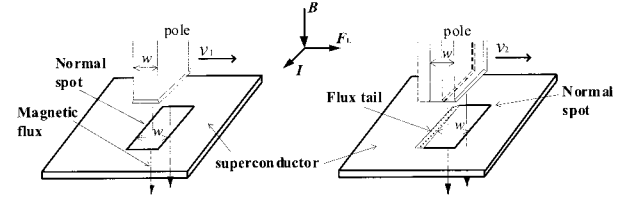


Fig. 3. Illustrations for the magnetic diffusion in the superconductor according to velocity of the moving magnetic field.

초전도체에서의 자기확산은 시변자장의 인가속도(주파수)에 영향을 받게 된다. 인가되는 자장의 이동속도에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 자기확산시간을 인가속도와 간접비교를 통해 자기확산이 시작되는 경계주파수를 계산하여 이동자속의 속도(주파수)와 시변하는 자장 B 가 초전도체에 인가될 때, 침투된 자속은 다음과 같은 관계를 가지고 확산하게 된다.

$$D_m \nabla^2 B = \partial B / \partial t \quad (1)$$

D_m 은 자기 확산율(magnetic diffusivity)이라 하며 ($= \rho / \mu_0$; ρ : 초전도체의 저항(resistivity), μ_0 : 진공 중에서의 투자율) 식 (1)을 통해 계산되어진다. 이와 같은 식 (1)에서 초전도체의 자기확산 특성방정식을 풀면 확산 시간 t_{md} 은 다음과 같이 표현된다[5].

$$t_{md} = \frac{(2a)^2}{\pi^2 D_m} \quad (2)$$

2a는 초전도체의 폭을 나타낸다. 확산시간을 이용하여 이에 상응하는 확산 주파수 $f_i (= 1/t_{md})$ 를 계산할 수 있다. 다시 말해서 초전도체의 자기확산을 발생시키는 경계주파수를 의미한다.

그림 3은 인가자속이 초전도체에 침투하며 이동할 때 침투면적이 확산되는 것을 간략하게 보여주고 있다. 초전도체에 전류가 흐르는 방향과 수직으로 이동자속이 인가될 때 전류의 방향의 수직 오른쪽으로 발생하는 로렌즈 힘 F_L 이 자장이 침투된 양자화된 플럭스 소이드(fluxoid)에 가해진다. 인가되는 이동자속이 F_L 에 의해 이동하는 플럭스 소이드 보다 빠르다면 침투된 부분이 넓어지는 것과 같은 확산이 발생한다. 즉, 자속의 뒷부분(flux tail)이 만약 시변하는 자장의 인가주파수 f 가 f_i 보다 작다면 확산의 속도가 천천히 발생하게 된다. 반면에 f 가 f_i 보다 빠르게 인가되면 침투된 자속의 영역이 급격히 증가하게 된다. 이와 같은 현상을 이동자속의 침투로 인한 침투영역의 확산현상이다.

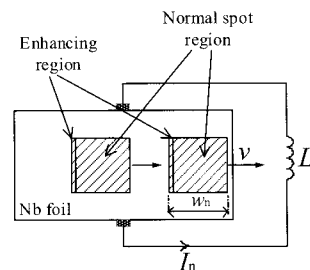


Fig. 4. Illustration for the LTMFP based on magnetic diffusion.

그림 4는 자기확산 현상을 LTMFP에 적용하여 이동 자장이 침투되는 노멀 스폿 영역의 확산을 보여준다. LTMFP는 공극에서 4극 이동자계를 발생시키므로 노멀 스폿은 2개가 생긴다. 이때 침투자계의 인가주파수가 빠르게 진행될 때 즉, f 가 f_c 보다 앞설 때, 침투영역의 확산이 발생하여 두 노멀 스폿 사이의 간격은 좁아지게 된다. 자기확산 특성 방정식을 통해 얻은 식 (2)를 통해 LTMFP의 Nb 박막에서 인가자계에 의한 자기확산 시간 t_{md} 을 구하면 다음과 같다.

$$t_{md} = \frac{(2a)^2}{\pi^2 D_m} = \frac{(2a)^2}{\pi^2 \left(\frac{\rho}{\mu_0} \right)} = 0.046 \quad (3)$$

LTMFP의 Nb 박막의 폭 $2a$ 는 60 mm 이고 저항값 ρ 는 $1 \times 10^{-8} \Omega m$ [6], μ_0 는 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 이다. 이와 같은 값을 적용하여 이론적으로 계산한 t_{md} 는 46 ms 이며 상응하는 확산주파수 값 f_c 는 21.7 Hz ($= 1/46 ms$)이다. 다시 말해서 이동자계 주파수가 21.7 Hz를 초과하게 되면 노멀 스폿 영역의 확산이 발생하게 된다. 이와 같은 이론적인 계산 값을 증명하기 위해 3차원 유한요소법을 이용하여 침투 자장의 분포를 수치적으로 계산하였다.

2.3. 시뮬레이션 해석 방법 및 결과

초전도 Nb 박막이 설치된 LTMFP의 자장분포 해석을 효과적으로 수행하기 위해서 그림 5와 같이 z축 방향으로 대칭이 되는 절반을 모델링하였다. 대칭된 표면은 자연경계조건(natural boundary condition)을 사용하여 계산을 수행하였다. 그림 5는 해석을 위한 모델링의 메시(mesh) 구조이다. 3차원 해석을 위한 LTMFP의 모델링은 실제크기와 같은 수치로 하였고 그림 5 (b)는 공극에 설치된 초전도 Nb 박막의 메시 구조이다.

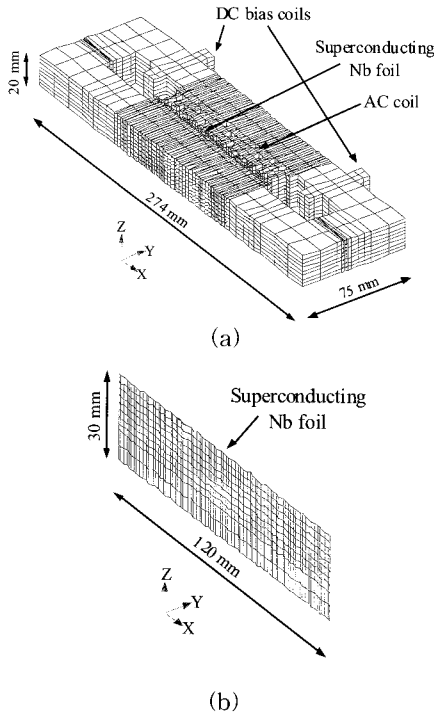


Fig. 5. 3-D meshing geometry of LTMFP (a) symmetrical half size of total geometry (b) half size of Nb foil (thickness: 20 μm).

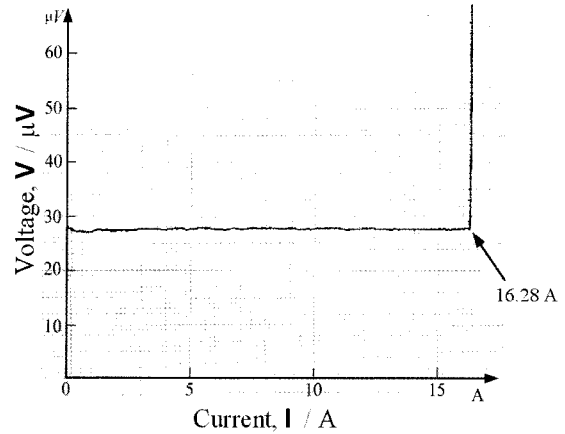


Fig. 6. Measured V-I curve of the Nb foil at 4.2 K (20 mm \times 2 mm \times 20 μm).

$$E = E_c \left(\frac{|J|}{J_c(\mu_0 |H|)} \right)^n \frac{J}{|J|} \quad (4)$$

초전도체는 전류밀도 J 와 전기장 E (J - E)의 특성관계가 비선형적인 특성을 갖게 되며, 일반적인 초전도 특성해석을 위해 식 (4)와 같은 관계식을 사용하여 계산을 수행한다. 본 논문에서도 식 (4)의 관계를 적용하여 계산을 수행하였다. 진한고덕체로 벡터표시를 하였다. n 은 초전도체의 J - E 곡선에서 기울기부분을 나타내는 값이고 초전도체의 비선형특성을 표현하는 값이다. 전계의 임계값을 나타내는 E_c 는 임계전류밀도 J_c 에 대한 전계의 기준 값이며 일반적으로 E_c 는 1 $\mu V/cm^2$ 의 값을 갖는다. 자기장을 나타내는 $\mu_0 H$ 값은 인가자장에 대해 초전도 Nb 박막의 에너지 손실부분만을 고려하였다. 초전도 Nb 박막의 $J_c(\mu_0 |H|)$ 의 값을 참고문헌[7]의 값을 사용하였고 다음과 같다.

$$J_c(\mu_0 |H|) = 4.07 \times 10^8 - 4.77 \times 10^9 \cdot \mu_0 |H| \quad (5)$$

또한 FEM계산을 효과적으로 수행하기 위해 E 의 방향은 항상 J 와 같은 방향이라고 가정하였다. 시뮬레이션을 실험과 같은 조건에서 수행하기 위해 초전도 Nb 박막의 임계전류 밀도 값을 실험적으로 계산하였고 4.2 K에서 $4.07 \times 10^8 [A/m]$ 의 값을 얻었다 (그림 6). 따라서, 초전도 Nb 박막의 비선형적인 특성해석은 식(4)와 (5)의 관계식 그리고 측정된 임계전류 밀도 값을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 X-Y 평면의 LTMFP의 자장분포 해석결과이다. LTMFP 시스템은 DC 10 A와 AC 6 A_{peak}에서 충전 특성실험을 수행하였다. 실험 측정값과 비교를 위해 같은 동작조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 철심 슬롯 중앙에 자속이 대칭적으로 분포되었음을 알 수 있다. 철심 슬롯의 최대 자속밀도는 615 mT이다. 이때 공극에서 발생하는 이동자속의 분포는 그림 8과 같다. 이동자속의 최대 자속밀도 값은 210 mT이고 최소값은 -20 mT이다.

그림 9는 공극에서 인가되는 이동자속을 주파수에 따라 Nb 박막(길이 120 mm)에 침투시킬 때 Nb 박막에서의 자속분포를 나타낸다. AC의 주파수 크기가 5, 10, 20, 40, 60Hz일 때의 자속분포를 나타낸다. Nb 박막에서의 침투자속의 세기는 최대값 203.3 mT이다.

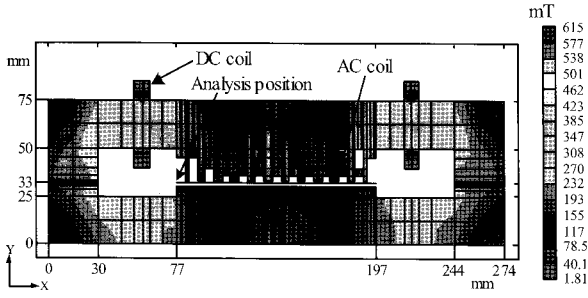


Fig. 7. The distribution of magnetic flux density with DC bias current at 10 A and AC current at 6 A_{peak} in the LTMFP. The analysis position is also shown as a line.

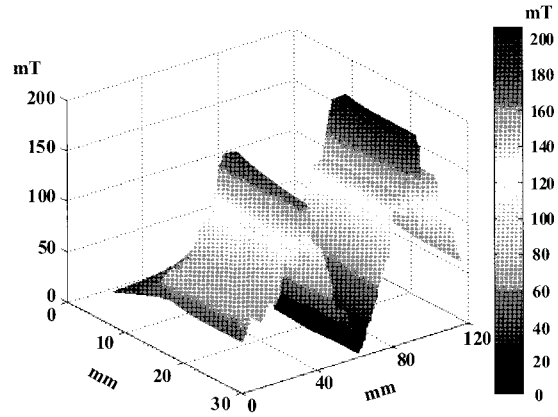


Fig. 10. Spatial distribution of the magnetic flux density obtained for $f=60$ Hz in Fig. 9.

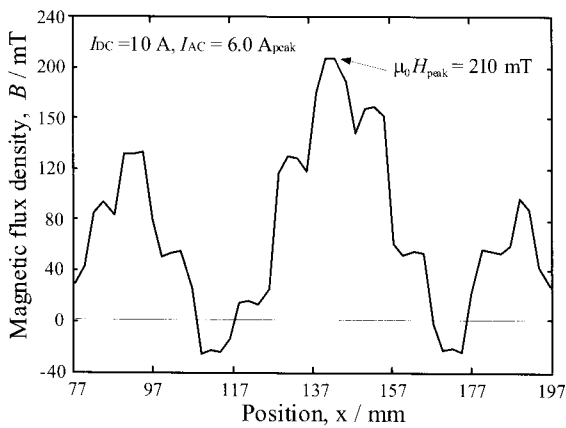


Fig. 8. Spatial variation of the magnetic flux density in analysis position of Fig.7.

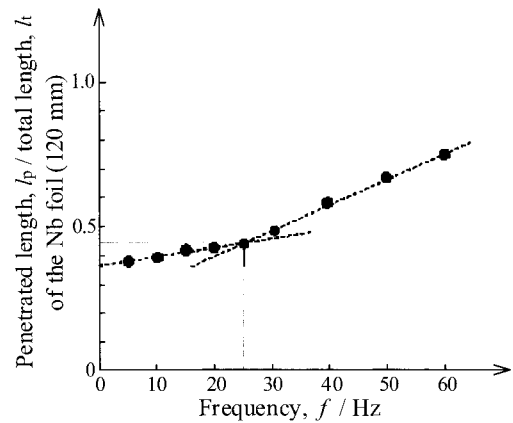


Fig. 11. Calculated results of the invaded magnetic flux normalized by the total length of the Nb foil (120 mm). The criterion for the definition of the invaded area is 100 mT.

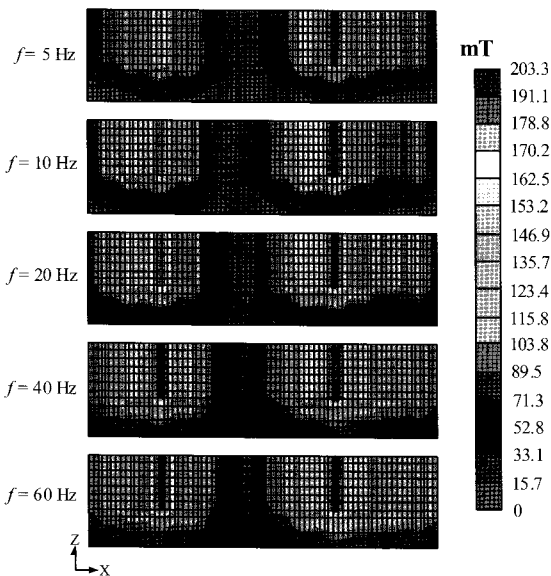


Fig. 9. Contour plots of the magnetic flux density in the Nb foil for different driving frequencies with the DC bias current at 10 A and the AC current at 6 A peak. The upper surface is the symmetrical plane of the upper part. The electrical angle of the A-phase is 120° .

20Hz 미만에서는 자기확산 현상이 작게 발생하는 반면 60 Hz에서는 급격하게 자기확산이 발생하는 것을

시뮬레이션을 통해 확인하였다. 확산 영역의 분포계산을 위해 그림 10과 같이 3차원적인 자기분포곡선을 침투영역으로 다시 계산하였다. 그림 10은 DC 10 A 와 AC 6 A_{peak}에서 주파수 60 Hz일 때의 자기분포영역곡선이다.

그림 11은 그림 10에서 자기분포영역 곡선을 통해 확산영역을 계산한 결과이다. 확산 영역의 계산에서 기준점은 100 mT로 하였다. 4.2 K에서의 초전도 Nb 박막의 경우 일반적으로 130~180 mT 정도의 값에서 $\mu_0 H_{c1}$ 을 갖게 되며 상의 전이가 발생한다. 자기 침투는 그 이전부터 발생이 시작되기 때문에 확산의 정도를 100 mT를 기준으로 하여 계산하였다. 인가 주파수가 25 Hz 미만에서는 자기확산의 정도가 천천히 발생하는 반면에 25 Hz 이상에서는 자기확산의 정도가 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 시뮬레이션을 통해 얻은 자기확산시간 $t_{md} = 0.04$ s 임을 계산하였다.

3. 결론

본 논문에서는 LTMFP시스템에서 인가자속의 주파수에 따라 Nb 박막에서 자기확산의 분포를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 인가 자속의 주파수가 25 Hz 이상에서 자기확산이 급격히 발생함을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 이론적인

식 (3)을 통해 얻은 이론적인 값 (21.7 Hz)과 거의 일치함을 알 수 있었다. 결과적으로 초전도 Nb 박막에서의 이동자속의 침투 속도 25Hz를 기준으로 침투영역의 확산 정도가 급격히 증가하는 자기확산현상을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] T. Miyazaki, Y. Murakami, T. Hase, M. Shimada, K. Itoh, T. Kiyoshi, T. Takeuchi, K. Inoue, H. Wada, "Development of Nb₃Sn Superconductors for a 1 GHz NMR magnet", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 2505-2508, 1999.
- [2] J.H. Bae, Y.S. Oh, S.J. Lee, T.K. Ko, "The Design Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Fluxpump with Superconducting Excitation Coil," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 672-675, 1998.
- [3] Y.D. Chung, I. Muta, T. Hoshino, T. Nakamura, 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, S.E. Yang, T.K. Ko, "Operating Analysis of Linear Type Magnetic Flux Pump," the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol. 11, no. 2, pp. 20-24, 2009.
- [5] M.N. Wilson, "Superconducting Magnets," Oxford University Press, pp. 143-145, 1983.
- [6] I. Muta, H. Tsukiji, T. Itoh, S. Ishii, T. Hoshino and E. Mukai, "Superconducting dynamo and its application to superconducting generator," Cryogenics, vol. 30, pp. 749-752, Sept. 1990.
- [7] R.P. Huebener, R.T. Kampwirth, R.L. Martin, T.W. Baebee, R.B. Zubeck, "Critical Current Density in Superconducting Niobium Films," Journal of Low Temperature Physics, vol. 19, no. 3, pp. 247-258, 1975.

저 자 소 개



이응로(李應魯)

1975년 12월 5일생, 2000년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2002년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



정윤도(鄭允道)

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



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.