

NMR 연구를 위한 HTS insert coil 및 LTS background magnet 설계

최석진*, 황영진*, 김영재*, 장기성*, 고태국*
연세대*

The design of HTS insert coil and LTS background magnet for NMR research

Sukjin Choi*, Young Jin Hwang*, Young Jae Kim*, Ki Sung Chang*, Tae Kuk Ko*
Yonsei University*

Abstract - 고해상도의 NMR 연구 개발을 위해서는 고자장의 마그넷 연구가 선행되어야 한다. 고자장을 구현하기 위해서는 저온초전도체를 이용한 마그넷뿐만이 아니라 고온초전도체를 이용한 인서트 코일의 연구가 필요하다. 연세대학교에서는 국가지정연구실사업으로 단백질 구조 규명의 초고자장 NMR 실현을 위한 고온초전도 인서트 코일 기술연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 고온초전도 인서트 코일 연구를 위해 제작할 LTS background magnet과 HTS 인서트 코일에 대한 전자장 해석을 진행하였다. 균일도나 선재 사양 등의 주요 변수 등을 고려하여 LTS background magnet과 HTS 인서트 코일에 적합한 사양을 결정하도록 하였다.

1. 서 론

정확한 단백질 구조 분석은 신약 개발, 나아가 인간 생명 활동 규명에 핵심 기술로서 기술적, 경제적으로 매우 큰 파급효과를 갖는다. NMR은 외부 자기장 하에서 스핀 원자핵이 특정 주파수에서 공명하는 원리를 응용한 분자 구조 분석 방법으로 공명 주파수가 클수록 해상도가 높아 지는데 현재 900MHz NMR이 개발되었고, 분자량이 큰 단백질 구조까지 자세히 규명하기 위해 GHz급 NMR이 요구되고 있다. 공명 주파수는 외부 자기장의 세기와 비례하는데 실제로 1GHz급 NMR을 구현하기 위해서는 약 23.5T의 초고자장이 요구된다.

고자장 발생 마그넷의 소형경량화, 경제성 및 효율성을 향상시키기 위해 초전도 마그넷이 사용되는데, 기존 NMR의 경우 저온초전도 선재를 사용하여 마그넷을 제작하였다. 하지만 자기장의 크기가 커질수록 초전도체로 흘릴 수 있는 전류의 크기가 제한된다는 임계전류 특성으로 인하여 기존 저온초전도체의 경우 초고자장 응용에 한계가 있다. 따라서 GHz급 NMR 실현을 위한 초고자장 마그넷 개발을 위하여 기존의 고자장 마그넷에 자장에 대한 임계전류 특성이 좋은 고온초전도 선재를 사용한 마그넷을 추가로 삽입하여 초고자장 (23.5T 이상)을 발생시킬 수 있도록 하는 고온초전도 인서트 코일의 연구가 반드시 필요하다.

연세대학교에서는 고온초전도 인서트 코일에 대한 연구를 진행하기 위해서 외부 자장 인가를 위한 LTS background magnet과 HTS insert coil을 제작할 예정이다. 본 논문에서는 제작에 앞서 LTS background magnet과 HTS insert coil에 대한 전자장 해석을 수행하고, 전자장 해석을 통하여 주요 변수들에 대한 특성을 파악한 후, NMR 연구에 가장 적합한 사양들을 찾도록 하였다. 이렇게 정해진 사양으로 제작을 한 후, 특성평가를 하여 설계값에 대한 신뢰성을 검증할 예정이다.

2. 본 론

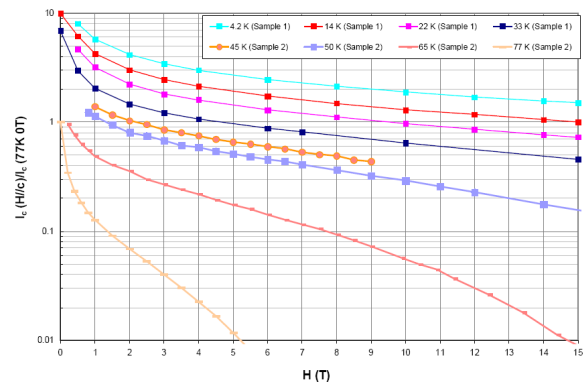
2.1 HTS insert coil

HTS insert coil 제작에 사용되는 선재는 SCS 4050이며, 선재 사양은 다음 <표 1>과 같다.

고온초전도 선재의 임계전류는 자장의 세기, 방향 및 온도에 의존하며,

<표 1> SCS 4050 선재의 사양

Spec	SCS 4050
Width	4mm
Total Thickness	0.095mm
Total Copper Stabilizer Thickness	0.04mm
Substrate Thickness	0.05mm
Critical Bend Diameter	11mm
Critical Current	80~110A



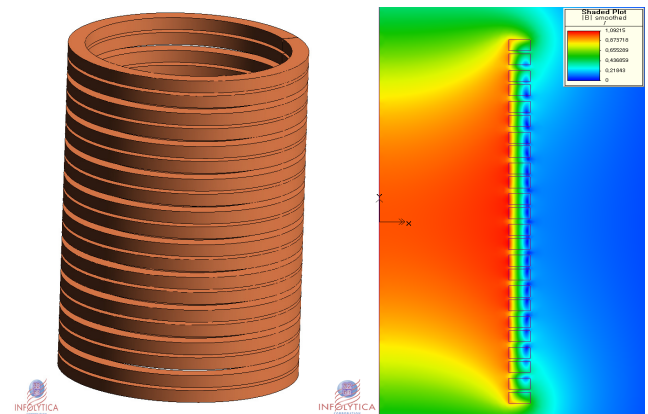
<그림 1> SCS 4050 선재의 수직 자장에 따른 임계전류

수평자장 보다는 수직자장에 더욱 크게 의존한다. 따라서 외부 수직자장에 따른 임계전류의 변화를 고려하여 고온 초전도 마그넷의 운전전류를 결정하여야 한다. SCS 4050 선재의 수직자장에 따른 임계전류 변화는 <그림 1>과 같다. 여러 변수에 따라 전자장 해석을 수행하여 coil에 걸리는 최대 수직 자장을 계산한 후, <그림 1>에 따라 운전전류를 결정하게 된다. 전자장 해석은 상용 전자장 해석 프로그램인 infolytica사의 MagNet을 사용하였다.

HTS insert coil은 더블 팬케익을 적용한 형태이며, 해석 모델 및 자장 분포는 다음 <그림 2>와 같다.

선재 소모량을 300m, 운전전류는 200A로 고정시킨 상태에서 더블 팬케익의 수를 늘려가며 해석을 진행하였고, 해석 결과는 <표 2>와 같다. 운전전류는 수직 최대 자장에 따라 임계전류를 계산하고 임계전류*0.7로 정하였다. 균일도를 해석한 공간은 중심에서 30mm로 (최대자장-중심자장/중심자장*100으로 산출하였다).

더블 팬케익 수가 늘어남에 따라 중심자장은 작아지지만, 반경 균일도나 높이 균일도는 더 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 같은 선재량을 사용하는 경우 코일의 높이가 높아진다면 중심자장은 작아지고, 균일도는 좋아지는 것을 알 수 있다. 중심자장과 균일도를 고려할 때 더블 팬케익의 개수가 16개인 HTS insert coil이 가장 적합하다고 생각되어진다. <표 2>의 모델은 싱글 팬케익 사이의 갭을 1mm, 더블 팬케익 사이의



<그림 2> HTS insert coil의 해석 모델 및 자장 분포

〈표 2〉 HTS insert coil의 DPC 수에 따른 해석 결과

DPC 개수	Turn 수	중심 자장 [T]	수직 최대자장 [T]	선재 소모량 [m]	반경균일도	높이 균일도
10	55	1.96	1.67	295	4.81	11.3
12	47	1.78	1.50	300	2.92	7.43
14	40	1.58	1.34	295	1.83	4.51
16	35	1.42	1.22	293	1.19	2.90
18	31	1.28	1.12	291	0.8	1.93

〈표 3〉 HTS insert coil의 gap에 따른 해석 결과

gap [mm]	코일높이 [mm]	중심자장 [T]	수직 최대자장 [T]	반경 균일도	높이 균일도
SPC 1 DPC 2	174	1.42	1.22	1.19	2.90
SPC 2 DPC 4	200	1.159	1.082	0.394	1.265
SPC 4 DPC 8	312	0.83	0.930	0.912	0.306

갭을 2mm로 한 결과이며, 싱글 팬케익 사이의 갭과 더블 팬케익 사이의 갭을 늘려가며 해석을 진행한 결과는 <표 3>과 같다. 팬케익 사이의 갭이 커짐에 따라 중심 자장은 작아지고 높이방향 균일도는 좋아지는 것을 확인할 수 있었지만, 반경방향 균일도는 좋아지다가 다시 나빠지는 것을 알 수 있다. 반경방향 균일도만을 고려한다면 팬케익 사이의 갭은 싱글 팬케익 사이의 갭이 2mm, 더블 팬케익 사이의 갭을 4mm로 하는 게 HTS insert coil에 가장 적합하다고 판단하였다.

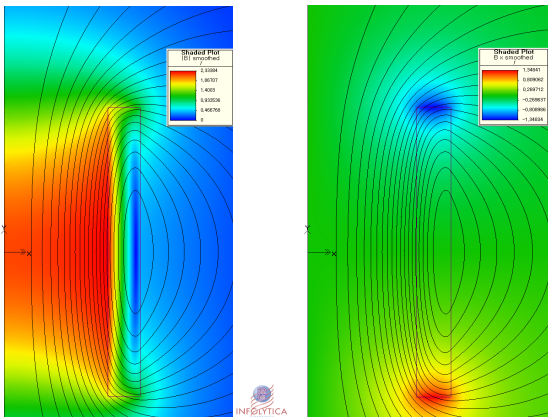
2.2 LTS background magnet

HTS insert coil에 외부 자장을 인가하기 위한 LTS background magnet에 대한 해석을 진행하였다. LTS background magnet 제작에 사용된 선재는 oxford 사의 NbTi 선재이며 선재 사양은 다음 <표 4>와 같다.

LTS background magnet은 저온용기에 맞도록 제작할 예정이며, 이렇게 정해진 사양을 바탕으로 해석을 진행하였고, 그 해석그림과 해석 결과는 각각 <그림 3>, <표 5>와 같다. HTS coil에 비해 LTS magnet은 최대 수직 자장에 따른 임계전류로 운전전류를 정하기 힘들다. 고온 초전도와 달리 저온 초전도 마그넷의 경우 일반적으로 turn수가 많고 각각의 선재의 이동에 의한 쿨치발생이 일어날 수 있기 때문이다. 저온 초

〈표 4〉 NbTi 선재 사양

Manufacturer	Oxford Instrument
Material	NbTienamel/braidedconductor
# of Filaments	54
Ic @ 6T	>800A
Bare Wire Diameter	1.10mm
Formvar Insulated Diameter	1.104~1.116mm
Braided Wire Diameter	1.36~1.39mm



〈그림 3〉 LTS background magnet의 자장 분포

〈표 5〉 LTS background magnet 해석 결과

Iop [A]	중심자장 [T]	수직 최대자장 [T]	반경 균일도	높이 균일도
120	1.74	1.12	1.12	2.58

〈표 6〉 HTS insert coil과 LTS background magnet을 동시에 운전하는 경우의 해석 결과

LTS 운전전류 [A]	HTS 운전전류 [A]	중심자장 [T]	반경 균일도	높이 균일도
120	48	2.009	1.039	2.305
110	71	2.001	0.987	2.225
100	96	2.004	0.931	2.140
90	120	2.001	0.876	2.057
80	145	2.004	0.820	1.971

전도 마그넷의 운전전류는 마그넷의 함침, magnet 제작 경험, training 효과를 고려하여 운전전류를 정하여야 한다. 이렇게 정해진 사양과 운전전류로 해석한 결과 LTS background magnet만 운전하는 경우 중심자장 1.74T가 나왔고 반경 균일도는 1.12., 높이 균일도는 2.58이 나왔다.

2.3 HTS insert coil & LTS background magnet

HTS insert coil과 LTS background magnet을 동시에 운전하는 경우에 대하여 해석을 진행하였다. 앞에서 가장 적합하다고 판단되는 형태를 모델링하였으며, 2T의 중심자장을 내는 조건으로 HTS insert coil과 LTS background magnet의 운전전류를 서로 바꿔가며 해석을 진행하였다. 그 해석 결과는 <표 6>과 같다.

LTS 운전전류를 낮추고, HTS 운전전류를 높임에 따라 균일도는 더 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 해석 결과로 볼 때, LTS insert coil과 LTS background magnet을 동시에 운전하는 경우, 운전전류에 따라 균일도가 달라지며 균일도가 좋은 마그넷의 운전전류가 높아짐에 따라 전체 균일도도 좋아지는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

NMR 연구를 위한 HTS insert coil과 LTS background magnet의 제작에 앞서, 전자장 해석을 통하여 가장 적합한 마그넷의 형태를 찾도록 하였다. HTS insert coil만 운전하는 경우 coil의 형태가 높아질 수록 균일도는 좋아지지만 중심자장은 낮아지는 경향이 있으며, LTS background magnet과 동시에 운전하는 경우 각각의 운전전류에 따라 균일도가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 해석된 결과는 추후 마그넷 제작에 활용될 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (ROA-2009-000-20063-0)

[참 고 문 헌]

[1] T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Kosuge, M. Yuyama, H. Nagai, F. Matsumoto, "Generation of high magnetic fields using superconducting magnets", 2006
 [2] F. Hornung, M. Kläser, and T. Schneider, "Usage of Bi-HTS in High Field Magnets", JUNE 2004
 [3] 한국보건산업진흥원 수출통상팀, "바이오산업 세계시장 동향(2000년~2002년)", 2004