

NbTi 관내 3연선 도체의 안정성

장현만, 오상수, 하동우, 하홍수, 배준환, 김상철, 류강식, 王秋良
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Stability of Triplet NbTi Cable-In-Conduit Conductor

H.M.Jang, S.S.Oh, D.W.Ha, H.S.Ha, J.H.Bae, S.C.Kim, K.S.Ryu, Q.L.Wang
Korea Electrotechnology Research Institute, Applied Superconductivity Laboratory

Abstract - The normal zone propagation velocity and minimum quench energy (MQE) of cable-in-conduit conductors (CICC) has been investigated at the different background magnetic fields and supercritical helium pressures. The sample CICC of 2 m in length was fabricated with triplet NbTi/Cu strands inserting into a round stainless-steel tube. The heat pulse disturbance with duration time about 400 ms was acted on the center region of the CICC to quench the strands. The normal zone propagation velocity increased with operating current of the CICC. The measured velocity with respect to operation current could be fitted with numerical results.

1. 서 론

차세대 전기에너지 분야에 대한 연구로서 핵융합 초전도 마그네트, 초전도 에너지 저장장치, 초전도 발전기 및 초전도 케이블 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 핵융합 초전도 마그네트와 같이 규모가 큰 초전도 자석의 경우, 강자장 하에서 30 kA 이상의 대전류를 흘려야하며 도체에 가해지는 전자력도 상당히 크기 때문에 초전도 선재를 꼬아서 만든 케이블을 강도가 큰 구조재료로 에워싼 형태의 관내연선도체 (Cable-In-Conduit, CICC)를 주로 사용하고 있다[1][2].

관내연선도체는 큰 안정성, 높은 절연파괴전압, 높은 기계적 강도, 그리고 냉각용 액체헬륨의 전체 질량을 줄일 수 있다는 특징이 있다[3]. 이러한 CICC는 대형 초전도 마그네트를 제작에 사용되어져 오고 있다. 마그네트의 안정한 운전을 위해서는 켄치 현상, 특히 켄치 압력의 진전, hot-spot부분의 온도와 안정한 영역으로의 전파속도 등을 미리 알아두는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 핵융합 초전도 마그네트용 CICC에 대한 연구의 일환으로 소형 triplet NbTi 관내연선도체를 제작하여 열 적인 외부 교란에 대한 도체의 켄치 특성과 켄치 전파속도를 측정하였다. 또한 제작된 관내연선도체의 안정성을 열-수력학적으로 계산하여 실측치와 비교하였다[4].

2. 본 론

2.1 CICC 제작 및 특성 평가

본 연구에서 사용한 CICC는 IGC사에서 SSC용으로 개발된 0.807 mmφ의 NbTi /Cu 초전도 선재를 3가닥 꼬아서 내경 2.175 mm, 외경 3.175 mm, 길이 2 m인 스테인레스 튜브안에 삽입하여 만들었다. 그림 1에 나타난 것처럼 제작된 CICC를 외경

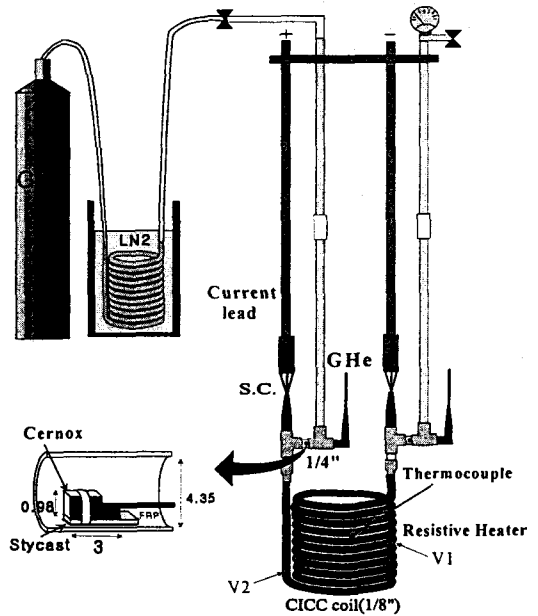


그림 1. 측정용 CICC 구성도
Fig. 1. Schematic drawing of CICC for test

표 1. NbTi 관내 3연선 도체의 사양
Table 1 Parameter of triplet NbTi Cable-In-Conduit Conductor

Diameter of strand	0.808mm
Number of filament	7890
Cu/NbTi (strand)	1.30
Inner diameter (conduit)	2.175 mm
Out diameter (conduit)	3.175 mm
void fraction	48%
Length	2 m

50 mm인 FRP 보빈에 감아 코일 형태로 만들었다. 도체에 열 적 교란을 주기 위하여 저항성 히터선을 관 내부의 초전도 소선에 직접 무유도 권선으로 감았으며, 0.9 m의 간격을 두고 각각 20 mm 씩 V1, V2 두 곳에 전압단자를 부착하여 켄치 전파속도 및 최소 켄치 에너지 (Minimum Quench Energy ; MQE)를 구하고자 하였다. 그리고 켄치 이후 관 내부의 온도변화를 관측하기 위하여 Au - 0.72Fe 열전대를 사용하였다. 측정시 외부 자장의 세기는 4T, 6T로 하였으며, 관 내부의 초임계헬륨(SHe) 압력은 5기압과 8기압으로 하였다. 최소 켄치 에너지를 구하기 위하여 히터선의 동작전류와 펄스 폭을 변화시키며 실험하였으며,

이때 외부자장의 세기는 4 T, CICC의 동작전류는 500 A로 하였다.

제작된 CICC의 임계전류는 관내부의 SHe 압력을 5기압으로 유지시키고, 5 T와 6 T에서 150 A/sec의 전류상승속도로 측정하였다.

2.2 이론적 배경

핵융합 초전도 마그네트를 위한 CICC의 열수력학적(thermo-hydraulic)분석이 열전달 방정식과 유체역학 방정식을 풀기 위한 multi-grid 법으로 수행되어지고 있다. 여기서 사용된 모델은 초임계 헬륨과 초전도 소선 사이의 높은 열전달의 근사치에 기초를 두고 있다. 초임계헬륨 상태를 결정 짓는 방정식은 연속 방정식, 운동량(momentum) 방정식, 에너지 보존 방정식에 열역학 방정식을 조합하여 얻을 수 있다[4].

CICC 길이 방향에 수직인 도체 내부 단면의 온도분포가 같다고 가정할 때, CICC 길이 방향으로의 온도분포는 다음 공식과 같은 열전달방정식에 의해서 결정된다. 이때 헬륨의 열전달은 대류에 의한 값보다 매우 작으므로 무시하였다.

$$\gamma C_{CW} \frac{\partial T_{CW}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{CW} \frac{\partial T_{CW}}{\partial x}) + \frac{Q_{CW}}{A_{CW}}$$

그리고

$$Q_{CW} = h_w P_{CW} (T - T_{CW})$$

여기서 P_{CW} , T_{CW} 는 관 내부의 온도, A_{CW} 는 관 내부의 단면적, t 는 시간, 그리고 Q_{CW} 는 선재와 SHe사이의 열전달 에너지이다.

3. 결과 및 고찰

제작된 CICC의 임계전류를 측정 한 결과 5T에서 2505 A, 6T에서 2205 A였으며, 이때 관 내부 기압은 5기압으로 유지시켰다.

그림 2는 외부 자장의 세기 6 T, 관 내부의 압력 8기압, 동작전류 400 A일 때 퀠치 전파속도를 측정하기 위한 실험 결과이다. 이 때 히터선의 동작전류는 210 mA였으며, 400 ms동안 유지시켰다. V_1 부분의 퀠치 이후 V_2 부분이 퀠치 될 때까지의 시간차이를 V_1 과 V_2 사이의 간격으로 퀠치 전파속도를 구하였다.

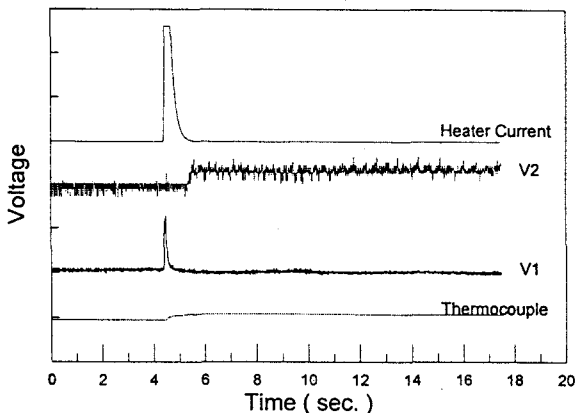


그림 2. 6 T, 8기압에서의 히터전류 및 전압파형(동작전류:400 A)

Fig.2 Waveform of heater current and voltage at 6 T, 8 atm.

그림 3은 외부 자장의 세기가 4 T, SHe압력이 5기압과 8기압일 때 CICC 운전전류에 대한 정상영역으로의 퀠치 전파속도를 구한 것이며, 그림 4는 외부 자장의 세기가 6 T일 때의 값을 나타낸 것이다. 그림에 표시된 실선은 실제 측정한 결과이며, 점선 및 쇄선으로 표시된 것은 제작된 CICC의 퀠치 전파속도를 이론적으로 계산한 값을 나타낸 것이다. 점선은 5기압일 때의 계산 값이며, 일점쇄선은 8기압일 때의 계산 값이다. 실측치 및 계산치 모두 동작전류 및 외부자장의 세기가 증가할수록 퀠치 전파속도가 증가하는 것을 보이고 있다. 이것은 일반적으로 동작전류가 임계전류에 가까워질수록 퀠치가 일어날 수 있는 에너지의 한계가 작아지며, 부분적인 주울 열(joule heating) 등에 의해 온도변화가 커지기 때문이다[5]. 그리고 관 내부의 기압이 5기압일 때가 8기압일 때보다 속도가 빠르며, 동작전류가 작을 때는 큰 차이가 나타나지 않았다.

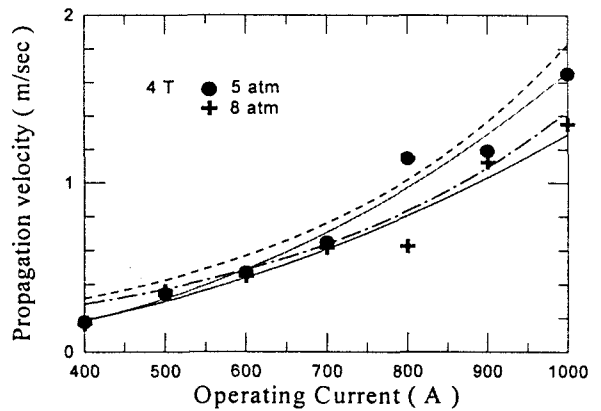


그림 3. 4 Tesla때 퀠치 전파속도 (실선 : 실측치, 점선 및 쇄선 : 계산치)

Fig. 3. Quench propagation velocity at 4 Tesla

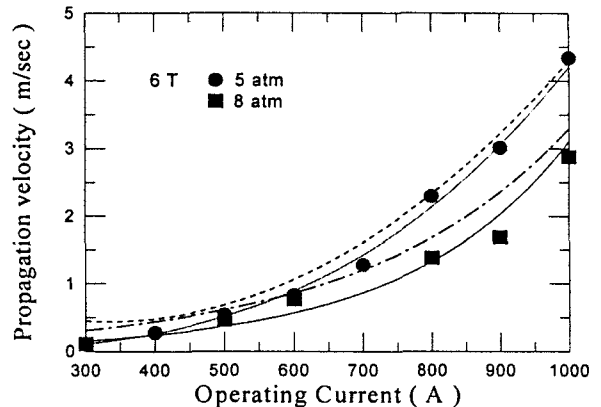


그림 4. 6 Tesla때 퀠치 전파속도 (실선 : 실측치, 점선 및 쇄선 : 계산치)

Fig. 4. Quench propagation velocity at 6 Tesla

CICC의 퀠치 전파속도는 초전도 소선 구조재의 열전도율에 비례하기 때문에 Cu/NbTi의 비율이 커질수록 퀠치의 전파속도는 빨라진다.

CICC의 외부 자장을 4T로 인가한 후 5기압과 8기압에서 히터선의 동작전류 및 전류인가 시간을 변화시켜 최소 퀠치 에너지를 구하였다. 히터선에 의해서 가열되는 초전도 소선의 체적은 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이며 히터선

의 체적은 3×10^{-8} 으로, 초전도 소선에서 흡수되는 퀘치 에너지는 5 기압의 SHe 일 때 206 kJ/m^3 였으며, 8 기압 일 때 145 kJ/m^3 였다.

4. 결 론

본 연구에서는 NbTi/Cu 관내 3연선 도체를 실제 제작하고 열 적 교란에 의한 퀘치 특성을 조사하였으며, 열수력학적 근거를 둔 수치적 계산으로 측정 결과와 비교하였다.

제작된 CICC의 히터선 가열에 의한 퀘치가 안정한 영역으로의 전파되는 속도를 측정한 결과 동작전류와 외부자장의 세기가 증가할수록 빨라지며, 계산치와 거의 유사하게 나타났다. 퀘치 전파속도는 5기압 일 때가 8기압 일 때보다 높게 나타났으며, 동작전류가 500 A 이하 일 경우에는 압력차이에 의한 속도 차이를 보이지 않았다.

제작된 CICC의 최소 퀘치 에너지는 5 기압 일 때 206 kJ/m^3 였으며, 8 기압 일 때 145 kJ/m^3 였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 류 경우, 류 강식, 오 봉환, 오 상수 "트카막 핵융합장치용 초전도 자석" Proceedings of KIEE. Vol. 45 No.7. Jul. 12, 1996
- [2] M. N. Wilson, Superconducting magnets. Claerndon Press, Oxford, pp. 306-310, 1983
- [3] Y.Wachi, et. al., "Investigation of the pressure rise during the quench of a force cooled superconducting coil" IEEE Trans. on Magnetics. vol.25, No. 2, 1989
- [4] Q.L. Wang, S.S. Oh, et. al., "Transient thermo-hydraulic analysys on Nb₃Sn Cable-In-Conduit conductor for the KSTAR toroidal magnet" Proceedings of PRIWAS'97, pp.27, July, 1977
- [5] Y.Iwasa " Case studies in superconducting magnets " Plenum Press. New York and London. pp. 206-209, 1994