

관내 권선(Cable-In-Conduit, CIC) 초전도 자석 (Superconducting magnet)에서의 한계 자속(ramp-rate limitation) 현상

정상권
한국과학기술원 (KAIST) 기계공학과

Ramp-rate limitation of CIC (Cable-In-Conduit) superconducting magnet

Sangkwon Jeong

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Cable-In-Conduit Conductor (CICC) is widely accepted as an advanced superconductor configuration for large scale applications such as tokamak fusion reactors, MAGLEV (MAGnetic LEVitation), and SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). The stability of CICC cooled with supercritical helium can be very high if it is operated below a certain limiting current. This limiting current can be determined by Stekly type heat balance equation. The stability characteristic of CICC for AC operation is more complicated than that of DC because there are additional instability sources which are associated with local flux change. Ramp-rate limitation is a phenomenon discovered during US-DPC (United States-Demonstration Poloidal Coil) program, which showed apparent quench current degradation associated with high dB/dt . This paper describes recent experimental investigation results on the ramp-rate limitation and discusses current imbalance, induced current, current redistribution due to local quench of the strand in the cable.

1. 서 론

초전도 자석을 이용한 핵융합로(superconducting tokamak), 자기부상열차 (MAGnetic LEVitation train, MAGLEV), 초전도 에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 등 규모가 큰 초전도 자석에서는 주로 10000 A 이상의 고전류를 도체가 흘려 보어야 하고 이때에 발생되는 로렌츠 힘도 상당히 크기 때문에 관내 권선(Cable-In-Conduit, CIC) 형식의 도체가 현재 많이 쓰이고 있는 추세이다. 관내 권선 도체라는 것은 그림 1에서 보는 바와 같이 직경 1 mm 미만의 초전도 선을 꼬아서 권선(cable) 형태로 만든 후에 그 주위를 저온에서 강도가 큰 구조재료로 애워싼 것으로 최종 완성된 도체의 단면을 보면 마치 순대처럼 관(tube) 속에 많은 초전도 선이 빽빽하게 차있는 형태이다[1]. 관내 권선 도체 내부의 공극 부위는 초임계 헬륨(supercritical helium)이 도체의 냉각을 위해서 흐르도록 되어 있고, 이러한 도체의 설계시 그 공극률과 초전도선들 간의 최적 접촉 전기 저항은 그것의 사용 목적에 따라서 적절하게 선택이 되어야 한다. 관내 권선의 가장 큰 잊점은 다음과 같다[2].

- 대형 자석의 건설시 둔튼한 구조적 잊점
- 고전압 발생과 관련된 전기적 절연문제
- 냉각용 헬륨량의 전체부피 감소
- 권선의 전체 AC 손실 (AC loss) 감소
- 냉각 열응력(cool-down thermal stress)에 의한 변형의 감소

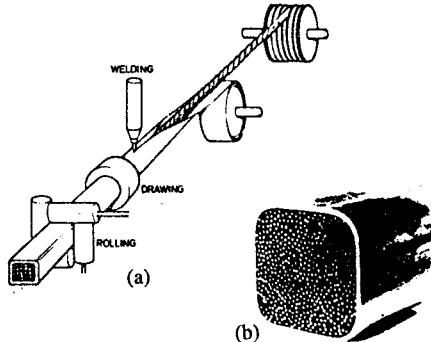


Fig. 1. (a) Production of a CICC by a continuous cable sheathing process.
(b) Cross-section of finished product (courtesy of Airco).

이러한 관내 권선 도체는 어느 한계 전류 이하에서는 상당한 외부의 교란이 있어도 내부에 존재하는 초임계 헬륨의 열적용량(heat capacity)을 충분히 이용할 수 있기 때문에 무척 높은 열적 안정성(thermal stability)을 갖는다. 하지만 이 한계 전류 이상에서는, 교란에 의하여 발생되는 열이 충분히 신속하게 초임계 헬륨으로 흡수되지 못하고 초전도선의 국부적인 온도 증가를 야기시키므로 외관상 관내 권선 도체의 안정성은 앞의 경우보다 10 배이상 낮아진다[3]. 초전도체를 quench시키는 외부적인 교란에는 여러가지 형태의 것들이 있겠으나, 본 논문에서는 자기장의 변화와 관련된 교란에 의한 한계 자속변화(ramp-rate limitation) 현상에 대하여 특별히 고찰하고자 한다.

2. 한계자속변화(Ramp-rate limitation)의 원인

1990년 DS-DPC(United States-Demonstration Poloidal Coil)의 실험 연구가 진행되면서[4], 이 문제의 심각성이 대두되었는데, 근본적으로 자장의 변화률(ramp rate)이 증가함에 따라서 초전도 권선 도체의 quench 전류가 저하되는 현상을 말한다. 이러한 한계 자속변화 현상은 권선의 수를 적게하여 모델권선을 만들어 실험을 하여도 그림 2와 같이 나타나는 것을 볼 수 있는데 US-DPC의 경우처럼 자장과 권선의 전류는 함께 증가

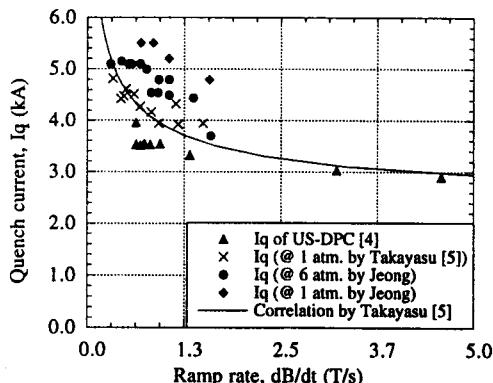


Fig. 2. Quench current degradation due to dB/dt .

하며 ($I = B/1.57$), 자장의 변화율이 커짐에 따라 quench 전류가 감소하는 현상을 보인다. 실제 US-DPC의 도체는 225개의 초전도 선으로 구성되어 있고 모델 권선은 27개의 초전도선이므로 그림 2에서 US-DPC의 quench 데이터는 27개의 모델 권선으로 환산한 전류값이다. US-DPC의 실험결과 이후 한계 자속변화를 일으키는 요인에 대해서는 많은 논란이 있었는데 그것들을 열거해 보면 다음과 같다 [5]: 기계적인 교란(초전도선의 움직임), 비정상적인 AC 손실의 상승, 자속변화와 관련한 flux jump, 비균일 전류분포, 초전도선의 횡단방향으로의 변형, 기계적인 손상 기타 등등.

US-DPC의 도체는 표 1에 나타난 바와 같으며, 주의할 사항은 Nb_3Sn 으로 구성되어 있으며, stabilizer인 구리의 RRR (Residual Resistivity Ratio)이 27인 것과 각 초전도선의 표면이 열처리 당시 구리의 소결현상(sintering)을 방지하기 위하여 크롬으로 코팅되어 있다는 것이다. 이와 비슷한 시기에 제작된 일본의 DPC-U 코일은 [6], Nb_3Sn 대신 NbTi 를 사용한 것으로 표 1에서 보듯이, 각 초전도선이 formvar로 절연되어 있었다. DPC-U 코일은 결과적으로 전체 AC 손실을 줄이는 데에는 성공하였지만 코일 내에서의 전류 공유분배(current sharing)가 불가능 하였으므로 상당히 심각한 quench 전류 감소 결과를 보였다. 최근 들어서는 한계 자속변화에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되어 그것을 일으키는 요인을 더욱 충분히 생각할 수가 있다. 정성적인 방법으로 이를 설명하자면 다음과 같다.

첫째, 한계 자속변화는 DC현상이 아니고 자속의 변화가 커지면 커질수록 더욱 심각해지는 AC 현상이다. 즉 자속변화시 국부적인 유도전류가 Faraday의 법칙에 의하여 초전도선을 따라서 생성될 것임을 예측할 수 있다. 물론 이러한 유도전류의 발생을 막기 위하여 전선을 균일하게 고도록 하지만 각 권선이 영향을 받는 자속의 변화는 균일하지가 않으므로 그러한 불균형에 의하여 충체적인 유도전류의 생성이 이해될 수 있고 [7] 실험적으로도 그것이 증명된 바 있다. [8, 9] 참고로, 이와 비슷한 유도전류는 SSC (Superconducting Super Collider)의 dipole 자석같은 경우에서도 오랜 특성 시간(time constant=L/R, L : inductance, R : resistance)을 가지며 존재한다는 것이 알려졌다 [10].

둘째, 한계 자속변화 현상은 초기의 전류 불균일 분포에 의하여 더욱 악화될 수 있다. 즉, 초기 전류가 전선에 흐르기 시작할 때 각 초전도선의 저항값(impedance)은 서로 같지 않으므로 전선의 단면에서 각각의 전류 크기를 비교하면 그림 3과 같이 불균일할 것이다. 이러한 초기 전류분포의 불균일성은 joint의 설계를 개선한다면 어느 정도 완화될 수 있으리라 사료된다.

TABLE I
Parameters of the US-DPC, DPC-U, TPX-PF model cable

	US-DPC	DPC-U	TPX-PF model
Wire diameter	0.78 mm	1.12 mm	0.79 mm
Stabilizer	54 % copper	Cu:CuNi: NbTi = 3.4 : 1.4 : 1	3.1 Cu/Non-Cu ratio
Twist pitch	12.7 mm	12.4 mm	12.7 mm
RRR	~ 27	N/A	~ 180
Wire surface condition	Cr coating (1~2 μm)	Formvar (10 μm)	Cr coating (1~2 μm)
Conduit	Incoloy 908 or 903	CSUS-JN1 Stainless steel	Incoloy 903
Cabling	3x3x3x5x5 or 3x3x3	3x3x3x3x6	3x3x3 Hybrid cable (9 copper strands and 18 superconducting strands)

셋째, 위에서 열거한 이유때문에 권선내의 초전도선은 국부적으로 임계치에 먼저 도달하는 경우가 생겨 quench 현상은 충분히 일어날 가능성이 있으며, 그때에 초전도체를 냉각시키고 있는 헬륨이 신속하게 발생되는 열량을 흡수하여 초전도체의 온도가 전류 공유분배 온도(current sharing temperature)보다 더 상승하는 것을 방지할 수 없다면, 전류 재분배(current redistribution) 현상은 적절하게 이루어지지 못하고 총괄적 quench (catastrophic global quench)로 발전하게 된다. 즉 국부적인 교란에 의한 열발생과 헬륨으로의 열전달 성격이 결과적으로 총괄적인 한계 자속변화를 좌우한다. 27개의 초전도선으로 모델 전선을 제작하여 실험을 한 경우 국소전압 측정 데이터를 보면 놀랍게도 도체가 완전히 quench하기 전까지 몇번의 교란과정이 있음을 알 수 있다. 그림 4의 (a)에서처럼 $\text{dB}/\text{dt} = 2.5 \text{ T/s}$ 로 자장이 증가할 때 여러 개의 전압 스파이크 신호는 관내 권선내에서 전류의 재분배가 일어나고 있다는 증거이며 계속되는 전압 스파이크 후에 결국은 너무 임계상황에 가까워져서 전체 quench로 도달하게 된 것이다. 한번 그림 4의 (b)는 관내 권선의 초기 총 전류가 (a) 보다 낮은 경우로서, 비록 한계 자속변화에 따른 교란으로 인하여 전류 재분배가 여러번 생겨도 헬륨의 냉각조건이 충분하게 발생되는 열량을 흡수하게 되면 전체 quench는 일어나지 않을 수 있다. 그림 5는 한계 자속 변화의 요인들을 충돌적으로 도식화한 그림인데 위에서 언급한 내용 이외에도 관내 권선 도체의 구성 초전도선이 움직이거나 flux jump가 일어나는 것도 한계 자속변화의 가능한 요인으로 간주될 수 있으나 아직 직접적인 증거는 보이지 않고 있다.

3. 한계자속변화(Ramp-rate limitation)의 해결방안

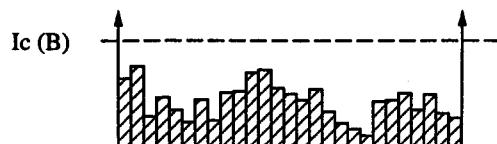


Fig. 3. Non-uniform current distribution in cable.

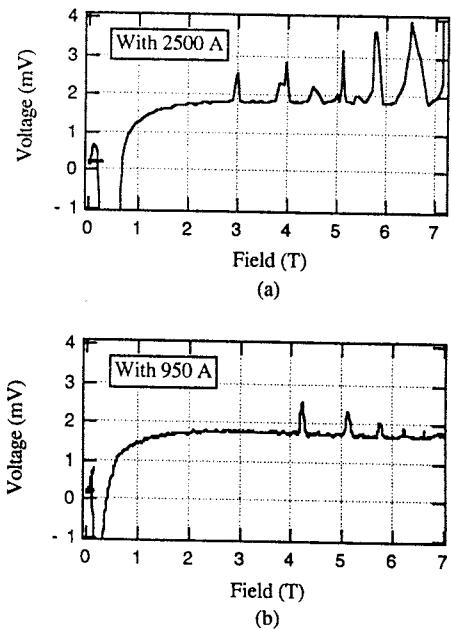
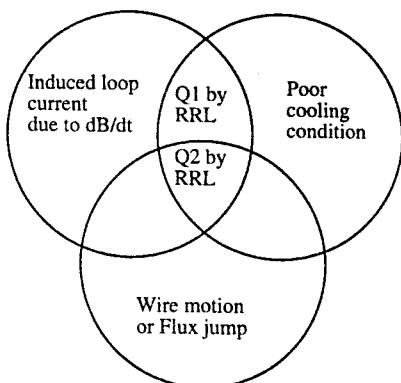


Fig. 4. Voltage spike data for different initial transport current ($dB/dt = 2.5 \text{ T/s}$)
(a) Quench with 2500 A transport current.
(b) No quench with 950 A transport current.

앞에서 정성적으로 묘사를 한 한계 자속변화에 대한 정량적인 해석과 모델링은 좀 더 간단하게 적은 수의 초전도선으로 구성된 관내 권선에 대하여 우선 많이 진행되고 있으나, 본 논문에서는 대중용법의 일환으로 한계 자속변화 현상을 억제할 수 있는 실질적 방법과 그러한 개념을 가지고 설계되었던 TPX (Tokamak Physics Experiment)의 PF (Poloidal Field) 코일의 모멘 권선에 대한 실험 결과를 고찰해 보고자 한다. 표 1에서 보듯이 이 관내 권선 도체는 RRR이 비교적 크며 hybrid 형식으로 구성되어 순수 구리선이 권선의 33 %를 차지한다. 결과적으로 전체 전류밀도는 떨어지고 stabilizer의 비중은 상당히 증가되었다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 4000 A 이하에서는 한계 자속변화 현상이 매우 미약하



Q1 by RRL : Quench due to usual ramp-rate limitation
Q2 by RRL : Quench can be enhanced by additional heat generation due to wire motion or flux jump.

Fig. 5. Origins of ramp-rate limitation.

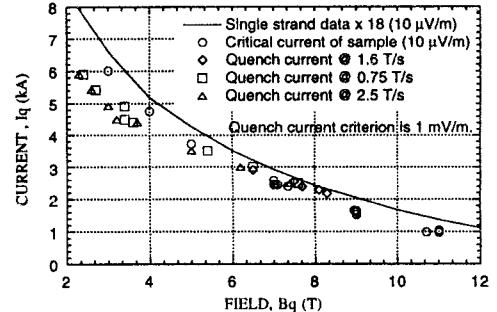


Fig. 6. Ramp-rate limitation experiments of TPX-PF subcable.

며 그 이상에서도 2.5 T/s 까지 quench 전류가 임계값에 상당히 근접하여 US-DPC 도체보다 훨씬 개선된 특성을 보이고 있다. 이 도체는 최근의 실험결과인 그림 7에서 보듯이, 심지어는 TPX에서 플라즈마 초기 생성과정 동안의 매우 큰 자장교란을 예상하는 실험인 -25 T/s 의 변화에서도 안정하게 작동되었다[11].

4. 결 론

한계 자속변화 현상은 권선도체가 외부의 급격한 자기장 변화에 대하여 견디지 못하고 임계값 보다 훨씬 이전에서 quench하는 것인데 주로 그 요인은 권선내의 초기 전류 불균일도, 자속변화에 의해 유도되는 전류, 그리고 교란시 발생되는 열량을 효과적으로 흡수하지 못하는 헬륨의 냉각조건으로 볼 수 있다. 이러한 한계 자속변화 현상은 AC 자석의 응용에 매우 중요한 역할을 하며 그 것의 근원적인 해결방안은 아직 계속 연구되고 있다. 한 가지 대중적인 방법으로는 전체 도체의 전류밀도를 낮추고 stabilizer로 사용되는 물질의 순도를 높임으로써 결과적으로 순간적인 normal transition이 일어날 경우에 전기 저항치를 낮추어 안정성을 높이는 것이 효과적인 방법으로 고려되고 있다.

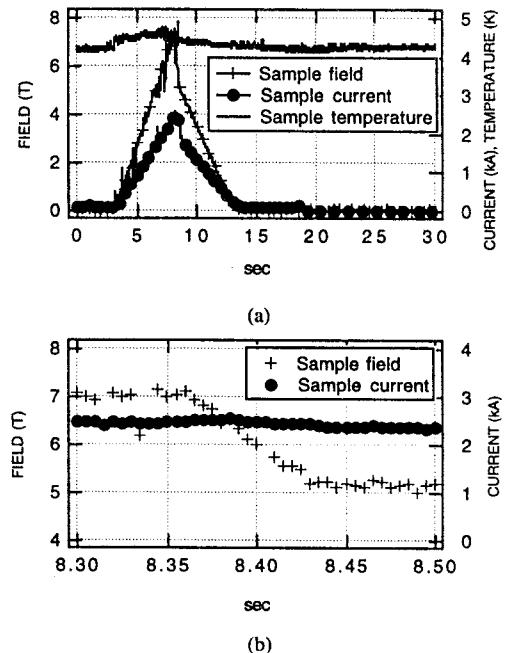


Fig. 7. Experimental data of TPX plasma initiation simulation.

참고문헌

- [1] M. N. Wilson, *Superconducting magnets*, Clarendon Press, Oxford, pp. 306-310, 1983.
- [2] J. W. Lue, "Review of stability experiments on cable-in-conduit conductors," *Cryogenics*, Vol. 34, No. 10, pp. 779-786, 1994.
- [3] J. V. Minervini and L. Bottura, "Stability analysis of NET TF and PF conductors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 2, pp. 1311-1314, 1988.
- [4] M. M. Steeves, et al., "Test results from the Nb₃Sn US-Demonstration Poloidal Coil," *Adv. Cryo. Eng.* vol. 37A, Plenum, New York, pp. 345-354, 1991.
- [5] M. Takayasu et al., "Measurements of ramp-rate limitation of cable-in-conduit conductors," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 3, no. 1, pp. 456-459, 1993.
- [6] N. Koizumi, K. Okuno, Y. Takahashi, H. Tsuji, and S. Shimamoto, "Stabilized operation of 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U) with uniform current distribution in conductors," *Cryogenics*, Vol. 34, No. 12, pp. 1015-1022, 1994.
- [7] C. Sihler, R. Heller, W. Maurer, et al., "Analysis of the electrodynamics of subcable current distribution in the superconducting POLO coil cable," *Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 5653*, Karlsruhe, Germany, October 1995
- [8] V. Vysotsky, M. Takayasu, J. V. Minervini, M. Ferri, and S. Shen, "New method of current distribution studies for ramp rate stability of multistrand superconducting cables," *IEEE Trans Appl Supercond.* vol. 5, pp. 580-583, 1995.
- [9] V. Vysotsky, M. Takayasu, and J. V. Minervini, "Jumps of the local magnetic field near CICC during external magnetic field ramp and their connection with ramp rate limitation," paper presented at 1995 Cryogenic Engineering Conference, Columbus, Ohio, 1995.
- [10] A. Akhmetov, A. Devred, R. Schermer, and R. Mints, "Current loop decay in Rutherford-type cables," *Supercollider 5*, Plenum, New York, 1993.
- [11] S. Jeong, J. H. Schultz, M. Takayasu, V. Vysotsky, P. C. Michael, W. Warnes, and S. Shen, "Ramp-rate limitation experiments using a hybrid superconducting cable," to be published in *Cryogenics*, 1996.