

CIC초전도 도체의 안정성



Stability of the Cable-in-Conduit Conductors

류경우
(Kyung-Woo Ryu)

Abstract

A Quench in cable-in-conduit (CIC) conductors is often initiated by a disturbance such as strand motion that generates a highly localized normal zone in a strand or a few strands of the CIC conductors. The localized normal zone causes current and heat transfer between a disturbed strand and neighboring strands. Electrical and thermal contact characteristics between strands thus have an effect on the transient stability of the CIC conductors. In this paper, the effect of contact characteristics between strands on the CIC conductor stability is presented based on the measured heat transfer characteristics of supercritical helium (SHe) for the local heating. The quench and recovery processes of the strands for the abrupt and highly localized disturbances are analysed at the boundary between quench and recovery.

Key words(중용용어) : Cable-in-Conduit(관내연선도체), Stability(안정성), Electrical Contact Conductance(전기접촉컨덕턴스), Thermal Contact Conductance(열접촉컨덕턴스), Quench and Recovery(퀵치 및 회복)

1. 서 론

관내연선도체는 (CIC도체) 기존의 액체헬륨 (LHe) 냉각의 초전도도체와 비교해 전기절연특성이 매우 우수할 뿐만 아니라 초전도 응용에서 큰 문제로 대두되는 기계적 강도 또한 대단히 커, 대형 초전도 자석에 (예: 초전도 에너지 저장장치 및 핵융합장치) 널리 이용되고 있다. 그러나 스텐레스 (SUS)와 같은 고강도의 관로내에 수납된 CIC도체의 구조에서는 약 40 %의 초임계헬륨 (SHe) 냉매의 공간이 있어 강한 전자력에 의해 초전도선 1본 또는 수본이 국부적으로 운동하게 되고 이와 같은 초전도선 사이의 매우 작은 마찰 발열에 의해서도 CIC도체는 임계전류보다 대단히 작은 통전전류에서 초전도성을 상실해 버리는 불안정성을 나타내는 것으로 널리 보고되고 있다¹⁾.

초전도선의 1본 또는 수본에 발생한 마찰 발열은

(이하 외란(disturbance)이라 함) 공간적으로 국부적일 뿐만 아니라 시간적으로도 수백 μs 의 대단히 짧은 시간동안 지속되는 특징을 갖는다. 이러한 국부적 외란은 초전도 선에 매우 국부적인 상전도 영역을 발생시키며 비절연의 초전도 선으로 구성된 CIC도체에서는 초전도 선간의 저항 및 온도 불균형에 의해 전류 및 열의 전달이 초전도 선간에 발생된다. LHe 냉매에 대한 최근의 몇몇 연구결과도 초전도 선간의 전기적·열적 접촉특성이 3본 초전도도체의 안정성 및 전류 분포에 영향을 크게 미치는 것으로 보고되고 있다²⁾⁻³⁾. 따라서 본 연구에서는 국부적 외란에 대해 초전도 선간의 전류 및 열의 전달을 고려하여, 전기적·열적 접촉특성이 CIC도체의 안정성에 미치는 영향을 조사하였으며, 안정성 경계에서 퀵치 및 회복과정으로부터 그 원인을 규명하였다.

2. 해석모델

보통 3본의 초전도 선을 트위스트해 1차케이블을 만들고, 이들 3본을 다시 트위스트해 2차케이블, 이와 같은 방법을 반복해 수백 본의 초전도 선으로 된

*전남대학교 전기공학과
접수일자 : 1997년 10월 16일
심사완료 : 1997년 11월 14일

CIC도체가 구성되며, 초전도 선간의 전기적·열적 접촉은 1차케이블 내에서 가장 강하게 된다. 따라서 1차케이블의 1본 초전도 선에 국부적 외란이 인가될 때 초전도 선간의 전류 및 열 전달을 고려한 CIC도체의 안정성에 중점을 둔다.

2.1. 열평형방정식

CIC도체내 초전도선의 온도분포는 보통 직경이 약 1 mm이하로 초전도선의 단면에 대해서는 균일한 것으로 가정해도 좋으며, 따라서 축방향의 1차원 열 모델에 의해 계산 가능하다. 국부적 외란이 인가된 초전도 선과 (이하 No.1 소선이라 함) 인가되지 않은 초전도 선에 (이하 No.2 혹은 No.3 소선이라 함) 대한 열평형방정식은 각각 식(1)과 (2)로 나타내어진다.

$$S \frac{\partial}{\partial x} (k(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x}) - Sc(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} - Pq_{SHe} + Sg + p_{ds} + \sum_{j=2}^3 g_{1,j} - \sum_{j=2}^3 p_{1,j} = 0 \quad (1)$$

$$S \frac{\partial}{\partial x} (k(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x}) - Sc(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial t} - Pq_{SHe} + Sg + g_{2,1} - p_{2,1} = 0 \quad (2)$$

여기서 T_1, T_2 는 No.1 및 No.2 소선의 온도, S 는 소선 단면적, k 는 유효 열전도도, c 는 소선의 유효비열, P 는 냉각 주변길이, q_{SHe} 는 SHe로 열 전달, g 는 상전도 영역에서 발생하는 주울 손실, p_{ds} 는 외란, $g_{i,j}$ 는 소선간 접촉부에서 발생하는 주울 손실, $p_{i,j}$ 는 소선간의 접촉 열 전달로써 식(3)으로 나타내어진다.

$$p_{i,j} = TG(T_i - T_j)S_c \quad (3)$$

여기서 TG 는 단위면적당 소선간 열접촉컨덕턴스, S_c 는 소선 단위길이당 접촉면적이다.

2.2. SHe로 열 전달

소선의 운동에 의한 외란은 앞서 지적한 바와 같이 수백 μs 의 대단히 짧은 시간동안 지속되며⁴⁾ 이와 같은 외란에 대해 CIC도체의 켄치 및 회복의 판단에 소요되는 시간은 1 ms정도임을 그림 5.로부터 알 수 있다. 대단히 짧은 시간동안의 발열에 의한 SHe로의 열 전달 특성을 조사하기 위해 K. Ryu 등은 개방 및 실제 CIC도체와 동일한 상황인 소형체널 샘플에 대한 과도 열 전달 시험을 행한 바 있다⁵⁾⁻⁶⁾. 이들 시험결과는 SHe로의 열 전달 특성은 SHe 압력에 무관하게 일정함과, 특히 수백 μs 의 대단히

짧은 시간동안 지속되는 외란에 대하여 중요한 최초 발열 개시후 1 ms까지는 열 유속에도 무관하며 이후부터는 열 유속이 증가할수록 SHe로의 열 전달 특성도 미약하게 증가하는 것을 보이고 있다. 또한 발열개시 후 1ms동안 SHe의 과도 열 전달 계수는 열전도 기구에 근거한 식(4)로부터 계산된 이론치와 잘 일치하고 있음을 보여준다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r}) - \rho(T)c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

여기서 T 는 SHe 온도, $\lambda(T)$ 는 열전도도, $\rho(T)$ 는 밀도, $c_p(T)$ 는 정압비열, r 은 원통좌표계의 좌표이다. 이는 대단히 짧은 시간동안 지속되는 국부적 외란에 대한 SHe의 과도 열 전달 특성은 CIC도체 단면에 균일하게 외란이 인가될 때 일반적으로 발생하는 것으로 알려진 열 유도류에 의해 지배되는 것이 아니라 열전도 기구에 의해 지배됨을 의미한다.

수백 μs 동안 지속되는 외란에 대한 SHe로의 열 전달은 따라서 식(5)으로 나타내어진다.

$$q_{SHe} = h(T_i - T_b) \quad (5)$$

여기서 h 는 SHe의 열 전달계수, T_i 는 소선의 온도, T_b 는 열적 평형상태에서 SHe의 온도이다. 그림 1.에 식(5)에 사용된 SHe의 열 전달계수와 시간과의 관계를 나타내었다. 그림에서 SHe의 열 전달계수는

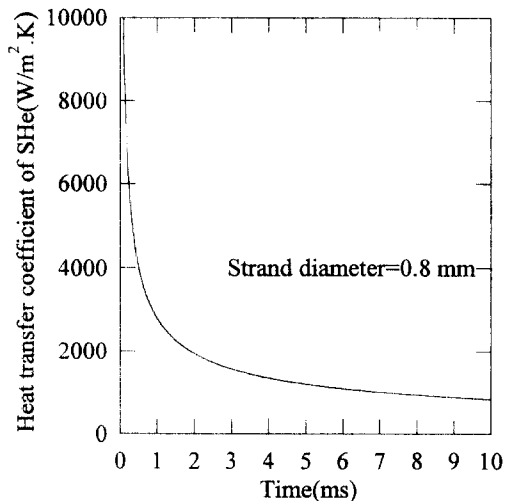


그림 1. SHe의 열 전달계수 - 시간 관계
Fig. 1. Heat transfer coefficient of SHe as a function of time.

실험결과가 열전도 기구에 의한 이론 치와 잘 일치한다는 사실로부터 본 해석에서 사용된 0.8 mm 직경의 초전도 선에 대해 식(4)에 근거하여 계산된 열전달계수이다.

2.3. 회로방정식

CIC도체내 초전도선의 전류분포는 도체를 축방향으로 2n개의 미소구간으로 분할하여 각 미소 회로구간에 분포되어있는 저항 및 인덕턴스를 하나의 등가 저항과 등가 인덕턴스로 모델링한 집중 정수회로부터 계산 가능하며, 본 회로 모델에서는 3분의 소선이 도체 축방향에 대해 대칭적으로 트위스트되어 있으며 극부적 외란이 인가되어 발생하는 상전도 영역의 중심에 대해 각 회로구간의 전류는 대칭이라고 가정했다. (n+l)번째 회로구간의 전압방정식은 식(6)으로 요약될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \sum_{k=1}^n (M_{1,n+l,1,n-k+1} + M_{1,n+l,1,n+k} - M_{1,n+l,2,n-k+1} \\ & - M_{1,n+l,2,n+k}) \frac{di_{1,n+k}}{dt} - \frac{1}{2} RT_{n+l-1} \cdot i_{1,n+l-1} \\ & + (r_{1,n+l} + \frac{1}{2} r_{2,n+l} + \frac{1}{2} RT_{n+l-1} + \frac{1}{2} RT_{n+l}) i_{1,n+l} \\ & - \frac{1}{2} RT_{n+l} \cdot i_{1,n+l+1} - \frac{1}{2} r_{2,n+l} \cdot I_i = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $M_{1,n+l,i}$ 는 No.1 소선의 (n+l)번째 구간과 i번째 구간의 상호인덕턴스, $M_{1,n+l,2,i}$ 는 No.1 소선의 (n+l)번째 구간과 No.2 소선의 i번째 구간의 상호인덕턴스, $r_{i,n+l}$ 는 No.i 소선의 (n+l)번째 구간의 상전도 영역의 저항, I_i 는 CIC도체의 통전전류, RT_i 는 i번째 구간에서 인접한 두 소선간의 접촉저항으로써 식(7)로 나타내어진다.

$$RT_i = 1/(EG \cdot S_c) \quad (7)$$

여기서 EG는 단위면적당 소선간 전기접촉컨닥턴스, S_c 는 i번째 구간의 소선간 접촉면적이다.

3. 결과 및 검토

극부적 외란에 대해 소선간의 전류 및 열의 전달을 고려하여, 전기적·열적 접촉특성이 CIC도체의 안정성에 미치는 영향을 해석하기 위해 t<0에서 도체는 전기적·열적으로 평형상태에 있으며 t=0에서 극부적 외란이 소선 No.1에 인가되는 것으로 하였다. 식(1)에서 초전도선의 운동에 의한 발열을 모의하기 위해 길이 20 mm, 지속시간 500 μs인 구형파의 외

란을 해석에서 사용하였으며, CIC도체의 소선은 전기적으로 절연이 되지 않아 임피던스 및 온도 불균형에 의해 소선간에는 전류와 열의 이동이 가능한 것으로 했다.

소선간의 전기접촉저항에 대한 실험결과는 현재까지 극소수 존재하지만⁽⁷⁻⁸⁾ 열접촉저항에 대한 실험결과로부터 접촉저항은 소선간 접촉면의 조건에 민감하며 따라서 그 크기는 대단히 불안정함을 알 수 있다. 예를 들면 참고문헌 7에서 접촉면적 4 cm², LHe 온도에서 고순도 알루미늄과 고강도 알루미늄 접촉의 경계저항이 약 2 Ω.cm²임을 고려할 때 단위면적당 소선간의 전기접촉 컨닥턴스는 5×10⁶ S/m²인 반면 참고문헌 8에서 NbTi/Cu 소선간 접촉에서는 단위면적당 소선간의 전기접촉 컨닥턴스는 6×10¹⁰ S/m²이다. 따라서 본 해석에서는 넓은 범위의 EG 및 TG에 걸쳐 CIC도체의 안정성을 조사하였으며, 해석에 사용된 도체의 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. CIC도체의 사양

Table 1. Parameters of the CIC conductor

Strand diameter	0.8 mm
Cu/NbTi ratio	1.5
Wetted perimeter	2.01 mm
Critical current	550 A at 5 T and 4.2 K
Void fraction	0.45
SHe pressure	8 atm

온도 및 전류의 초기치를 이용해 열평형방정식과 회로방정식을 동시에 풀었으며, CIC도체의 안정성 평가를 위해 도체가 초전도상태로 회복되지 못하는 최소의 외란 에너지인 최소퀸치에너지를 (이하에서 Minimum Quench Energy= MQE라 함) 평가기준으로 채택하였다. 또한 극부적 외란에 대한 MQE와 상대적으로 비교하기 위해 도체 단면에 균일하게 인가되는 외란에 대한 CIC도체의 안정성 시험결과를 이론적으로 검토할 때 이론의 간편함과 타당성 때문에 자주 이용되는 헬륨엔탈피파진을 평가기준으로 역시 채택하였으며 식(8)로 나타내어진다.

$$\Delta H = [(1-f)/f] \int_{T_b}^{T_{cs}} \rho C_p dT \quad (8)$$

여기서 T_b , T_{cs} 는 각각 SHe 및 초전도선의 분류개 시온도, ρ 는 SHe 밀도, C_p 는 정압비열, f는 관로의 내부 단면적에 대한 초전도선 부분의 단면적 비율을 나타낸다.

3.1. 결 과

CIC도체의 MQE 및 식(8)의 헬륨엔탈피마진을 여러 통전전류에 대해 계산하였으며, $TG=10^4 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ 즉 소선간 열접촉이 불량한 경우에 있어서 MQE와 초전도선의 임계전류로 정규화시킨 통전전류와의 관계를 여러 가지의 EG에 대해 그림 2에 나타내었다 또한 그림 3에 $TG=10^5 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ 즉 소선간 열접촉이 양호한 경우에 있어서 MQE와 통전전류와의 관계를 여러 가지의 EG에 대해 나타내었다.

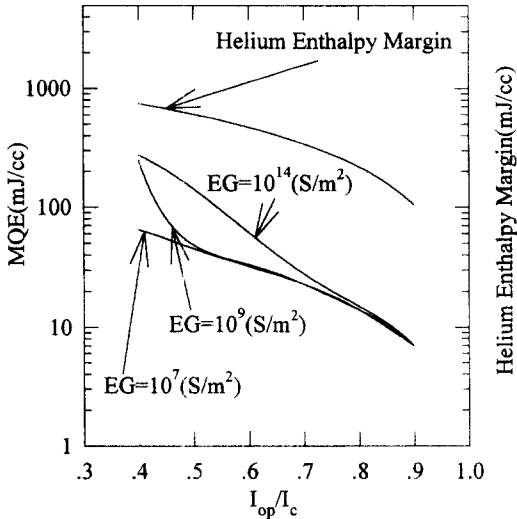


그림 2. $TG=10^4 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ 에 대한 5 T, 8 atm에서 MQE 및 ΔH - 통전전류 관계

Fig. 2. MQE and ΔH versus normalized operating current at 5 T and 8 atm for $TG=10^4 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$.

그림 2로부터 큰 통전전류 영역에서는 MQE가 EG에 따라 변화하지 않고 작은 통전전류 영역에서는 EG가 증가함에 따라 MQE도 증가하는 반면, 그림 3으로부터 전 통전전류 영역에서 EG가 증가해도 MQE는 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 2에서 $EG=10^7 \text{ S/m}^2$ 즉 소선간 전기접촉이 불량한 경우 혹은 그림 3의 소선간 열 접촉이 양호한 경우, 특히 작은 통전전류 영역에서 MQE가 헬륨엔탈피마진보다 매우 작음을 알 수 있다. 그림 4에 $EG=10^{14} \text{ S/m}^2$ 즉 소선간 전기접촉이 양호한 경우 MQE의 TG 의존성을 나타내었으며, 이 결과로부터 작은 통전전류 영역에서 MQE는 TG가 감소함에 따라 급격히 증가하여 헬륨엔탈피마진 정도까지 커지는 반면, 큰 통전전류 영역에서 이러한 경향이 반전됨을 알 수 있다.

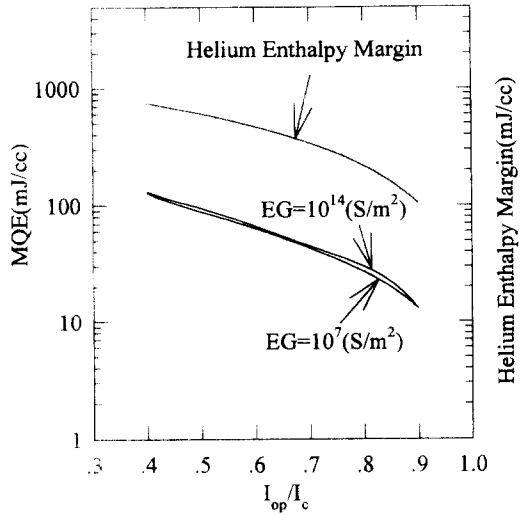


그림 3. $TG=10^5 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ 에 대한 5 T, 8 atm에서 MQE 및 ΔH - 통전전류 관계

Fig. 3. MQE and ΔH versus normalized operating current at 5 T and 8 atm for $TG=10^5 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$

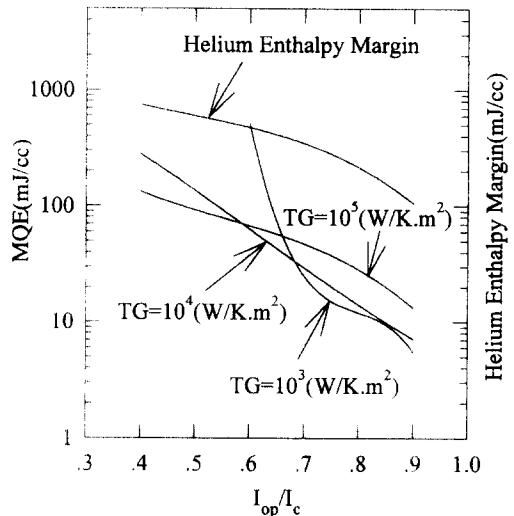
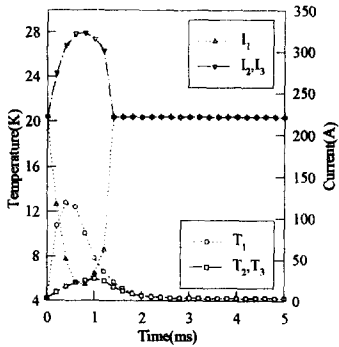


그림 4. $EG=10^{14} \text{ S/m}^2$ 에 대한 5 T, 8 atm에서 MQE 및 ΔH - 통전전류 관계

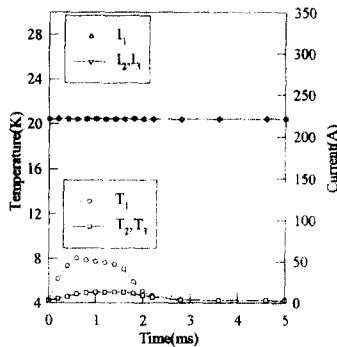
Fig. 4. MQE and ΔH versus normalized operating current at 5 T and 8 atm for $EG=10^{14} \text{ S/m}^2$.

3.2. 검토

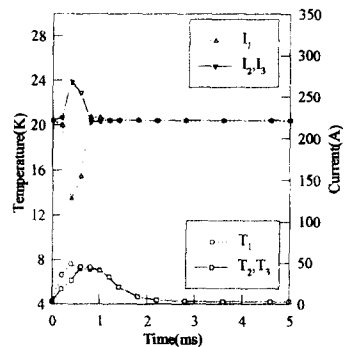
국부적 외란에 대한 CIC도체의 안정성 해석 결과



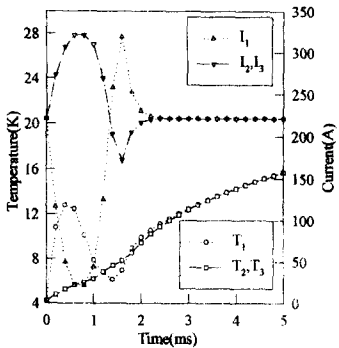
1) Recovery at input of 1.103 mJ



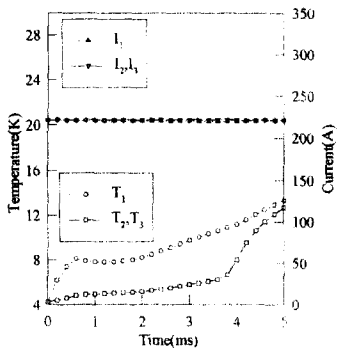
1) Recovery at input of 0.260 mJ



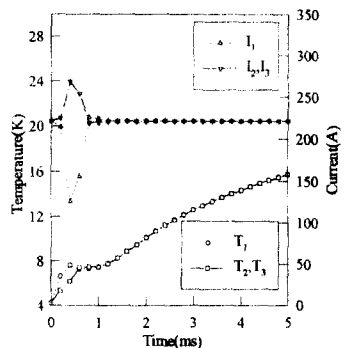
1) Recovery at input of 0.530 mJ



2) Quench at input of 1.109 mJ



2) Quench at input of 0.264 mJ



2) Quench at input of 0.533 mJ

a) $TG=10^4$ W/K·m² and $EG=10^{14}$ S/m²

b) $TG=10^4$ W/K·m² and $EG=10^7$ S/m²

c) $TG=10^5$ W/K·m² and $EG=10^{14}$ S/m²

그림 5. $I_{op}/I_c=0.4$ 에 대한 상전도 영역 중심에서 각 소선의 온도 및 전류 - 시간 관계

Fig. 5. Temperature and current of the strands as a function of time at center of a normal zone for $I_{op}/I_c=0.4$.

를 검토하기 위해 켄치 및 회복의 경계에서 각각 소선의 온도 및 전류를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 T_1 과 T_2 는 각각 No.1 소선 및 No.2 소선의 상전도 영역 중심에서의 온도를 나타내며, I_1 과 I_2 는 각각 No.1 소선 및 No.2 소선의 상전도 영역 중심에서의 전류를 각각 나타낸다.

그림 5의 a)로부터 소선간 열 접촉이 불량하고 전기 접촉이 양호한 경우는 소선간 큰 온도차 즉 큰 저항차와 작은 접촉저항 때문에 전류 전달이 용이함과, No.2 및 No.3 소선으로의 큰 전류 전달의 결과 No.1 소선의 상전도 영역에서의 주열 발열이 작아져 초전도상태로 회복이 가능해짐을 알 수 있다. 그림 5의 b)에서는 소선간 열 접촉 및 전기접촉이 둘다 불량한 경우 소선간 큰 온도차가 발생하더라도 큰 접촉저항 때문에 전류 전달이 어려움을 가리키며, 그림 5의 c)로부터 소선간 열 접촉 및 전기접촉이 둘다 양호한 경우는 작은 접촉저항 때문에 전류 전

달이 용이하게 일어날 수 있지만 동시에 열 또한 전달이 용이해 소선간 온도차가 거의 없어서 인접한 소선으로의 전류전달이 어려움을 알 수 있다. 따라서 이들 두 경우는 전류전달이 불가능해진 결과, 모두 MQE가 헬륨엔탈피마진과 비교해 대단히 낮아지게 된다.

4. 결 론

초전도선의 운동에 의한 국부적 외란에 대한 소선간 접촉특성이 CIC도체의 안정성에 끼치는 영향에 대해 조사하였다. 소선간 열 접촉이 불량하고 전기 접촉이 양호한 경우 MQE는 헬륨엔탈피마진과 비교될 만큼 높은 안정성을 갖는 반면, 그 밖의 경우에는 통전전류가 작은 영역에서조차 헬륨엔탈피마진과 비교할 때 안정성이 대단히 낮아 초전도소선의 마이크로한 운동에 의해 발생하는 매우 작은 발열에도 불구하고 CIC도체는 켄치되어 불안정해 질 수 있

음을 알 수 있다.

※ 이 논문은 1995년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Y. Wachi, M. Ono, S. Hanawa, J. Yamamoto and O. Motojima, "Stability of a cable in conduit type forced-cooled superconducting coil," *International Symposium on Safety of Superconductors and Related Heat Transfer at Low Temperatures*, session2B-1, 1994
2. N. Amemiya, K. Ryu, T. Kikuchi, and O. Tsukamoto, "Influence of current re-distribution and thermal diffusion among strands on stability of superconducting cables against local disturbances," *IEEE Trans. Magn.*, vol.30, pp2281-2284, July 1994.
3. M. Tsuda, N. Toyoda, M. Matsui, and A. Ishiyama, "Stability of non-insulated A.C. multi-strand superconducting cables," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, pp2854-2857, July 1996.
4. Y. Iwasa, *Case Study in Superconducting Magnets*, Plenum, pp.268-273, 1994.
5. K. Ryu, O. Tsukamoto, P.C. Michael and N. Amemiya, "Stability of cable in conduit internally cooled superconductors subject to local disturbance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, pp. 2312-2315, July 1994.
6. O. Tsukamoto, K. Ryu, P.C. Michael and N. Amemiya, "Transient heat transfer characteristics of supercritical helium and stability analysis of CCICS," *Cryogenics*, vol. 36, pp. 183-188, 1996.
7. Laila O. El-marazk, "A new approach to measure the electric boundary resistance between high current carrying stabilized SMES conductor and its high strength aluminum supporting structure at 4.2, 77 and 300 K," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 5, pp290-293, July 1995.
8. M.D. Sumption, H.H.J. ten Kate, R.M. Scanlan, and E.W. Collings, "Contact resistance and cable loss measurements of coated strands and cables wound from them," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 5, pp692-696, July 1995.

저자소개



류경우

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 일본 Yokohama National Uni. 대학원 전자정보공학과 졸업(공학박). 1986.5월-1995년 11월 한국전기연구소 초전도응용연구실 선임연구원. 1996년 1월-현재 전남대학교 공대 전기공학과 전임강사