

반복 단락 하에서의 GBCO Coated Conductor의 켄치 특성

안봉만¹ , 한병성², 김혜림³, 황지원⁴

¹ 전북대학교 산학협력단

² 전북대학교 전기공학과

³ 전 한전 전력연구원

⁴ 전북대학교 IT정보공학과

Quench Properties of GBCO Coated Conductors Under Repeated Short-Circuit Conditions

Bong-Man Ahn¹, Byung-Sung Han², Hye-Rim Kim³, and Jee Won Hwang⁴

¹ Industrial Cooperation Foundation, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

² Department of Electric Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³ Formerly KEPCO Research Institute, Daejeon 34056, Korea

⁴ Department of Information Technology and Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received March 12, 2021; Revised March 18, 2021; Accepted March 18, 2021)

Abstract: Durability of superconductors used to fabricate superconducting power machines is important, since the machines need to operate stably. Quench properties of GBCO ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) coated conductor tapes laminated with brass were measured and analyzed to investigate the durability of tapes under repeated short-circuit conditions. With short currents applied to the tapes repeatedly, the quench properties of tapes were measured, and bubbles generated during quenches were observed. The results showed that quench resistance and distribution were maintained after repeated quenches. They were maintained after repeated quenches at various applied voltages, which show durability of the tapes under repeated short-circuit conditions. The quench distribution was uniform throughout repeated quenches, which contributed to the durability of tapes.

Keywords: GBCO coated conductor, Quench properties, Repeated quenches

1. 서론

초전도 전력기기의 개발과 실증이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그중 초전도 케이블 및 초전도 한류기

는 실증 단계를 넘어 시장에 진입하는 단계에 있어 초전도 전력기기 중에서 가장 빨리 상용화될 것으로 예상된다 [1,2]. 초전도 전력기술은 초전도 현상을 전력기기에 응용하는 기술이다. 초전도체는 임계 값 이하의 온도, 전류, 자기장 하에서 저항이 0 (zero)이 되는 특징이 있어서 전류가 흘러도 주울 열이 발생하지 않는다. 그리고 일정한 값 (임계전류) 이상의 전류가 흘렀을 때 초전도성을 잃어 저항이 발생한다(켄치). 이 현상을 전력기기에 적용하면 기존의 기술보다 더 대용량의 전력을 고효율로 공급할 수 있으며, 큰 고장 전류를 신속하게 줄일 수 있다.

✉ Bong-Man Ahn; bmahn113@naver.com

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전기는 가정, 산업 등에서 필수적인 것으로 장기간 안정적으로 공급될 필요가 있으므로, 전기를 공급하는 데 사용되는 전력기기는 안정적으로 작동하여야 한다. 초전도 전력기기는 전력기기에서 기존의 동선 또는 알루미늄선 대신 초전도체를 도체로 사용한다. 초전도 전력기기가 안정적으로 동작하기 위해서는 초전도체가 안정적으로 성능을 유지해야 한다. 특히, 계통에 단락이 발생하였을 때와 같은 가혹한 조건에서 안정적으로 동작하여야 한다.

본 연구에서는 초전도체에 반복적으로 단락전류가 인가되었을 때의 특성을 측정하여 초전도체의 내구성을 측정하였다. 반복 단락에 대하여 기존의 연구가 있으나 [3-5], 직류 정전류를 인가하여 수행하거나 시료 전체 또는 구역별로 측정하여 시료 내의 상세한 켄치 분포를 알 수 없었다. 전력기기를 제작하는 데 주로 사용되고 있는 산화물계 고온초전도체는 재료의 특성 상 임계전류가 균일하지 않아 켄치 분포를 상세히 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 실 계통을 모의하여 전원으로 교류전원을 사용하고 켄치 분포를 상세히 관찰하여, 반복단락 하에서의 GBCO ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) coated conductor 선재의 켄치 특성을 측정 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료 준비

최근 상용급 초전도 전력기기를 제작하는 데에 경제성, 제작 용이성 등을 고려하여 액체질소를 냉매로 쓸 수 있는 ReBCO ($\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, Re = Y, Gd, Sm 등) coated conductor를 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 황동 안정화재가 있는 폭 4 mm, 두께 0.3 mm, 길이 48 cm의 GBCO coated conductor 선재를 사용하였다. 본 선재는 스테인레스 스틸 기판 위에 완충층을 증착하고 그 위에 GBCO를 증착한 후, 그 주위를 Ag와 Cu의 순서로 코팅하고 황동 안정화재를 부착한 구조로 되어 있다. 초전도 선재는 상전도 전류 단자에 부착하였다. 전류 단자는 켄치저항에 영향을 미치므로 중요하다 [6]. 상전도 단자의 재료로는 상용화 시 경제성을 고려하여 일반 구리를 선택하였다. 77 K에서 일반 구리와 무산소 고전도 구리의 열전도도(각각 501 W/mK, 547 W/mK) 및 전기저항(각각 $0.38 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, $0.34 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)에 큰 차이가 없기 때문이다. 단자의 단면적은 상온에서의 일반 구리 허용전류를 기준으로 정하였다. 상온에서의 구리 비저항 값($1.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)이 액체

질소 온도에서의 값($0.38 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)의 약 5배이므로 구리의 온도가 오르더라도 충분한 여유 마진을 가진다. 초전도 선재와 구리 단자는 용융점이 120°C 이하인 납땀을 사용하여 접합하였다. 초전도 선재의 양단에 구리 단자를 이와 같이 접합하고 이를 베이크라이트 판에 고정하였다. 초전도 선재가 베이크라이트 판에 평행하게 위치하도록 배치하였고, 선재와 베이크라이트 판과의 간격은 약 5 mm였다.

2.2 특성 측정 방법

GBCO 초전도 선재의 내구성을 검사하기 위해서 단락 특성 실험을 수행하였다. 실험에는 그림 1에 나타난 회로를 사용하였다. V_0 는 AC 전원 전압, 회로 저항 R_0 는 전류 측정 및 단락 전류의 크기를 조정하는 데에 사용하였다.

단락 특성을 측정하기 위하여 스위치 SW를 닫아 단락 전류를 발생시켜 켄치를 유도하였다. 초전도 선재의 내구성을 검사하기 위해 이를 50회 반복하였다. 단락전류 인가 간격은 2초로 하였다. 스위치로는 relay를 사용하였으며, relay의 on-off 동작을 프로그램하여 반복 단락 과정이 자동적으로 시행되도록 하였다. 반복 켄치를 시작하는 시점은 실제 선로에서의 상황과 같이 위상각을 고정하지 않고 무작위로 하였다. 시료를 효과적으로 냉각하기 위하여 시료가 액체질소에 잠겨 있는 상태에서 실험하였다. 초전도 선재의 특성을 알기 위하여 회로에 흐르는 전류와 초전도 선재 양단 간의 전압을 다중 channel digitizer를 사용하여 동시에 측정하였다. 아울러, 실험을 수행하는 동안 동영상 촬영하여 기포 발생 상황을 관찰하였다. 초전도 선재가 켄치할 때 열이 발생하는데 열의 일부가 주

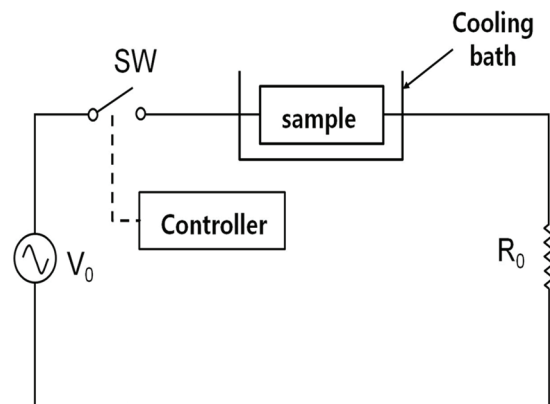


Fig. 1. A schematic of the measurement circuit.

변의 액체질소로 전달되어 액체질소를 기화시켜 기포가 발생한다 [7,8]. 따라서 퀘치 시에 초전도 선재 위에 발생하는 기포의 분포를 관찰함으로써 퀘치 분포를 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

초전도 선재에 반복적으로 단락전류를 인가하고, 반복 퀘치 초기와 말기의 퀘치 특성을 비교하여 초전도 선재의 내구성을 측정하였다. 그림 2에 2.7 V (단위길이당 5.6 V/m)의 전압을 인가하였을 때 초전도 선재 시료의 전류, 전압 및 저항을 나타내었다. 두 시점의 전류와 전압에 위상차가 있었는데, 비교하기 쉽게 하기 위하여 그림에는 위상을 맞추어서 나타내었다. 그림을 보면, 단락이 되어 초기에는 큰 전류가 흐르다가 초전도 선재에 저항이 발생함에 따라 제한되어 감소하였음을 알 수 있다. 이는 큰 전류가 흐를 때 초전도체가 초전도성을 잃으면서 선재에 저항이 발생하기 때문이다 [9]. 저항은 퀘치 시작 후에 서서히 증가하여 퀘치 시작 후 2주기에 약 25 mΩ가 되었다. 실험에 사용한 초전도 선재의 상온 저항은 30 mΩ이므로 초전도 선재의 온도가 약 250 K에 도달한 것으로 추정된

다. 초전도체가 퀘치되어 초전도성을 잃으면 전류는 기판과 안정화재 등 상전도체로 흐르게 되는데 상전도체의 저항은 온도에 따라 선형으로 변화하므로 저항 값으로부터 선재의 온도를 추정할 수 있다. 반복 퀘치 초기와 말기의 특성을 비교하면, 전류와 전압은 서로 겹치는 것을 알 수 있다. 이에 따라 저항의 크기가 비슷하여 반복 퀘치 후에 초전도 선재의 퀘치 특성이 유지되었음을 알 수 있다. 선재가 열화되었다면 선재의 평균 온도가 증가하여 저항이 증가하였을 것이다. 위에서 산정한 초전도 선재의 저항 값은 초전도 선재 전체에 대한 값이므로, 국소적 퀘치 특성을 알기 위하여 반복단락 시험 시 시료의 동영상을 촬영하여 퀘치 시 선재 위에 발생하는 기포의 분포를 관찰하였다. 그림 3에 5.6 V/m의 전압 인가 시 반복 퀘치 초기와 말기의 시료 사진을 나타내었다.

그림 3(a)에 전형적인 기포 발생 사진을 나타내었다 [7]. 세 사진 중 위 사진은 퀘치가 시작되기 전의 시료 사진으로 퀘치 후 사진과 비교하기 위해 나타내었다. 가운데 사진은 퀘치 시작 시의 시료 사진이다. 초전도 선재 위에 기포가 발생하였음을 볼 수 있다. 아래의 사진은 퀘치 시작 후 2주기 시점의 시료 사진이다. 기포의 크기가 커지고 많아졌음을 볼 수 있다. 그림 3(b)에 5.6 V/m의 전압 인가 시 반복 퀘치 초기에 위에서 내려다본 시료 사진들을 나타

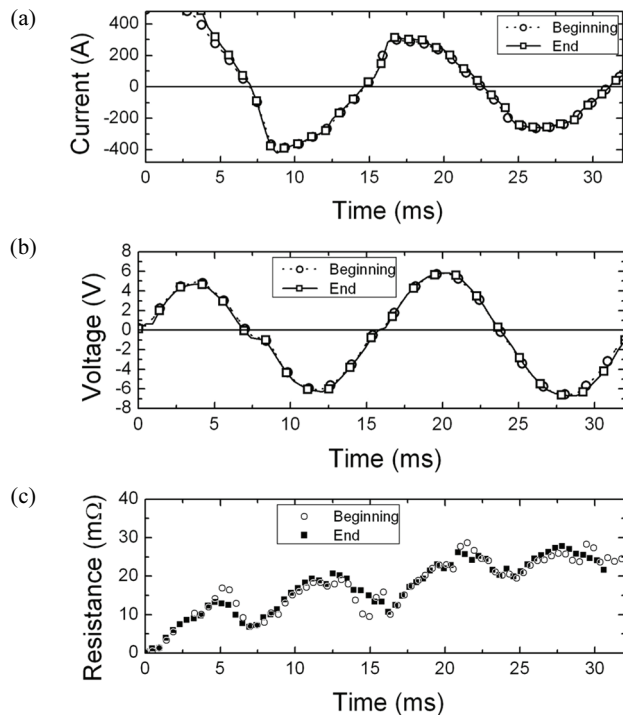


Fig. 2. Comparison of (a) current flowing in, (b) voltage of, and (c) resistance developed in a coated conductor tape at the beginning and at the end of repeated quenches at the applied voltage of 5.6 V/m.

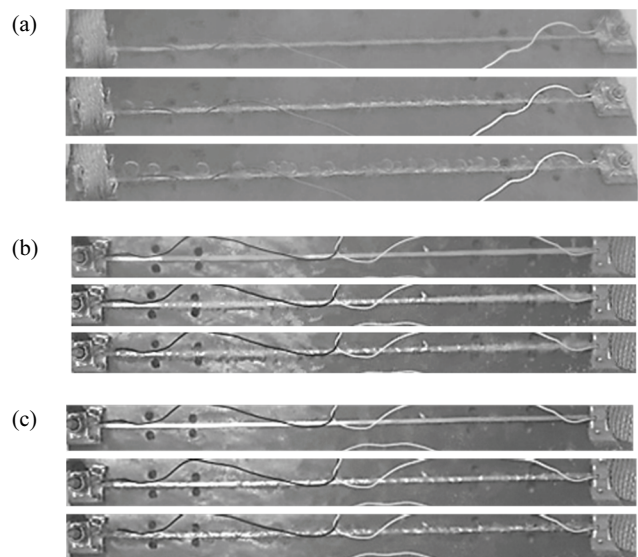


Fig. 3. Images of bubbles generated on GBCO tapes during quenches. (a) Typical images, (b) top views of bubbles at the beginning, and (c) at the end of repeated quenches at the applied voltage of 5.6 V/m. The top, the middle and the bottom figures show the image before, at, and two cycles after the quench start, respectively.

내었다. 발생한 기포가 선재 전체에 고르게 분포하였는데, 이는 선재의 온도 분포가 고름을 말한다. 이러한 고른 기포분포는 그림 3(c)에 나타낸 바와 같이 반복 퀘치 후에도 유지되었다.

단락 시 초전도 선재에 가해지는 에너지가 초전도 선재의 내구성에 미치는 영향을 알기 위하여 인가 전압을 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 그림 4에 전원전압 7.3 V/m 및 8.3 V/m를 인가하였을 때 반복 퀘치 초기와 말기에 초전도 선재에 발생한 저항을 비교하였다. 두 경우 모두 반복 퀘치 초기와 말기에 발생한 저항이 비슷하여 퀘치 특성이 유지됨을 알 수 있다. 7.3 V/m를 인가한 경우, 퀘치 시작 후 초전도 선재의 저항이 5.6 V/m를 인가했을 때에 비해 초기에 빠르게 증가하다가 그 후 서서히 증가하여 퀘치 시작 후 2주기에 약 27 mΩ에 도달하였는데 이는 약 270 K에 해당한다. 8.3 V/m를 인가한 경우에는 선재의 저항이 초기에 비슷하게 증가하여 2주기에 약 30 mΩ에 도달하였고 이는 약 300 K에 해당한다.

7.3 V/m와 8.3 V/m를 인가하였을 때에 초전도 선재에 발생한 기포를 보여주는 사진을 각각 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 두 경우 모두 기포가 선재 전체에 고르게 분포하였다. 고른 기포 분포는 두 경우 모두 반복 퀘치 후

에도 유지되었다. 선재에 발생하는 기포의 양은 이 두 경우와 앞에서 언급한 5.6 V/m를 인가하였을 때와 비슷하였다. 퀘치 시 초전도 선재에 발생한 열 중에서 주변의 액체질소에 전달되어 기포를 발생시키는 열의 양은 열전달 계수 h 와 초전도 선재의 온도 T 와 액체질소 온도 T_b 차의 곱, 즉 $h(T - T_b)$ 으로 나타낼 수 있는데, 세 경우의 온도 차이가 비슷하여(5.6 V/m, 7.3 V/m, 8.3 V/m를 인가하였을 때 각각 약 170 K, 190 K, 220 K), 발생된 기포의 양이 비슷한 것으로 생각된다.

위와 같이 인가 전압을 변화시켜 가며 일련의 반복 퀘치 실험을 수행한 후의 상태를 실험 초기의 상태와 비교하기 위해 다시 전원전압 5.6 V/m를 인가하여 반복 퀘치 실험을 수행하였다. 그림 7에 처음 5.6 V/m를 인가하여 수행

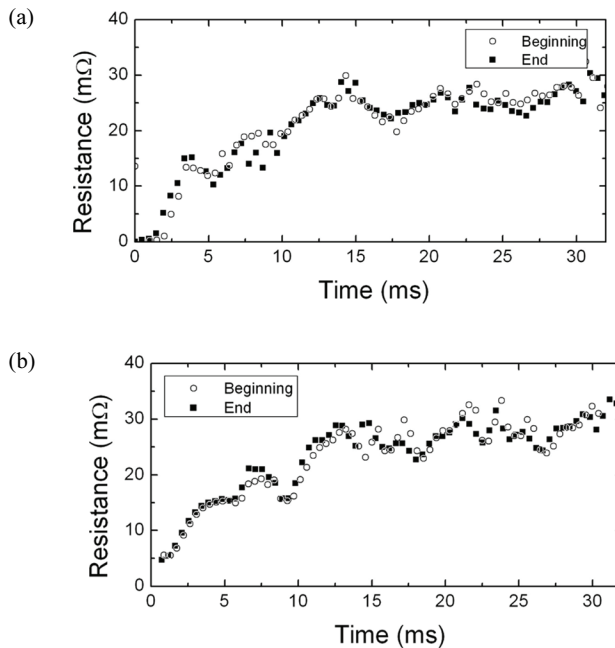


Fig. 4. Comparison of resistance developed in a coated conductor tape at the beginning and at the end of repeated quenches at the applied voltage of (a) 7.3 V/m and (b) 8.3 V/m.

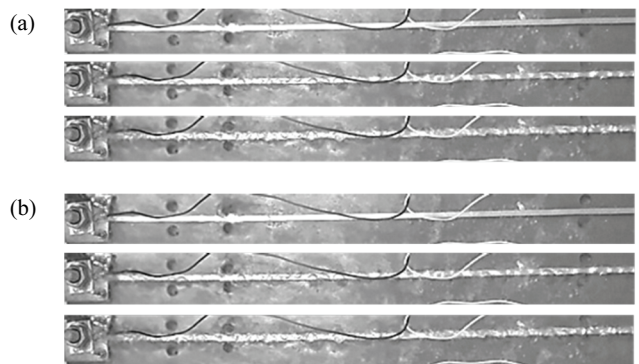


Fig. 5. Images of bubbles generated on GBCO tapes at the applied voltage of 7.3 V/m (a) at the beginning and (b) at the end of repeated quenches. The top, the middle and the bottom figures show the image before, at, and two cycles after the quench start, respectively.

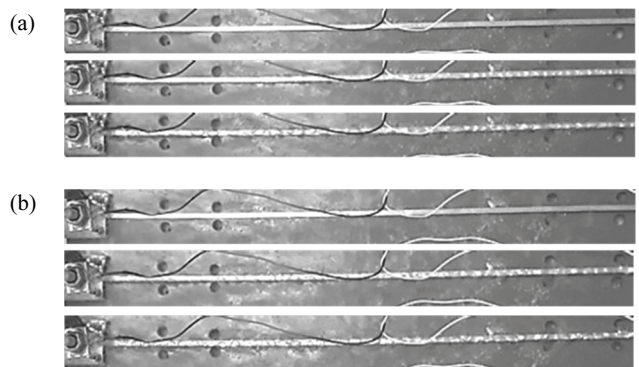


Fig. 6. Images of bubbles generated on GBCO tapes at the applied voltage of 8.3 V/m (a) at the beginning and (b) at the end of repeated quenches. The top, the middle and the bottom figures show the image before, at, and two cycles after the quench start, respectively.

한 반복 퀘칭 실험 초기의 초전도 선재 저항과 일련의 반복 퀘칭 실험 후에 다시 5.6 V/m를 인가하여 수행한 반복 퀘칭 말기의 저항을 비교하였다. 그림 8에는 두 경우에 초전도 선재 위에 발생한 기포 분포를 비교하였다. 그림 7을 보면 일련의 반복 퀘칭을 통한 총 300회의 반복 퀘칭 초기와 말기의 저항이 비슷함을 알 수 있다. 퀘칭 시 초전도 선재에 발생한 기포는 처음 5.6 V/m 인가 시의 반복 퀘칭 초기와 다시 5.6 V/m 인가 시의 반복 퀘칭 말기에 모두 고르게 분포하였다.

위와 같은 일련의 반복 퀘칭 실험을 다른 GBCO 시료에도 수행하였고 동일한 결과를 얻었다. 실험 결과를 종합하면 인가 전압을 변화시켜 가며 일련의 반복 퀘칭을 수행한 결과, 초전도 선재의 퀘칭 특성이 열화하지 않고 유지

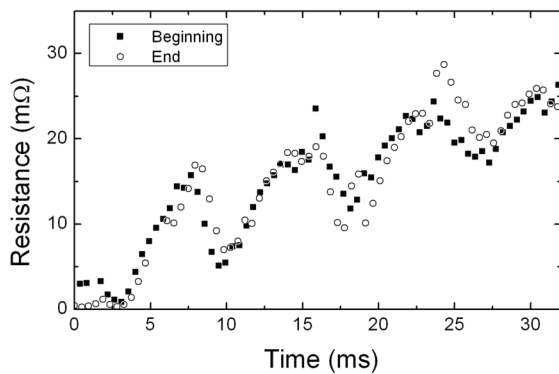


Fig. 7. Resistance developed in a coated conductor tape at the beginning of repeated quenches when 5.6 V/m was first applied and at the end of repeated quenches when 5.6 V/m was applied again after a series of repeated quenches.

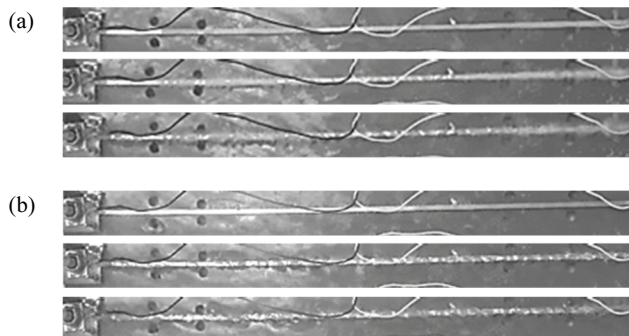


Fig. 8. Images of bubbles generated on GBCO tapes (a) at the beginning of repeated quenches when 5.6 V/m was first applied and (b) at the end of repeated quenches when 5.6 V/m was applied again after a series of repeated quenches. The top, the middle and the bottom figures show the image before, at, and two cycles after the quench start, respectively.

되었다. 반복 퀘칭 초기와 말기의 퀘칭 저항이 비슷하였고, 퀘칭 후 육안으로 초전도 선재를 보았을 때 손상되지 않았으며 퀘칭 시 초전도 선재에 발생한 기포의 분포가 유지되었다. 초전도 선재가 열화하지 않은 데에는 초전도 선재의 열적 안정성이 기여했다고 판단된다. ReBCO 초전도체는 산소가 없는 분위기에서 온도가 약 500 K 이상이 되면 산소가 빠져나가 초전도성을 잃는 것으로 알려져 있다. 또한 이 온도 범위에서는 안정화재를 접합하는 데 사용되는 접합제가 용융되기도 한다. 안전 마진을 두어 초전도체의 온도를 보통 상온 이하로 유지하는 것이 일반적인데, 선재의 평균 온도가 상온 이하라 하더라도 국소적으로 과열된다면 국소적으로 열화하여 선재가 손상될 수 있다. 그림 3, 5, 6 및 8에서 나타난 바와 같이, 전원 전압 5.6 V/m, 7.3 V/m, 8.3 V/m, 그리고 다시 5.6 V/m를 인가하고 반복적으로 단락하였을 때 초전도 선재 위에 발생한 기포가 고르게 분포하였다. 이로부터 초전도 선재가 국소적으로 과열되지 않고 온도가 고르게 분포하여 열적으로 안정적이었음을 알 수 있다.

한편, 반복 퀘칭 실험 후에 초전도 선재가 열화한 경우도 있었다. 본 실험 전에 예비실험으로 반복 퀘칭 실험을 수행한 다른 GBCO 선재 시료에 열화가 발생하였다. 반복 퀘칭 후에 선재 일부의 표면이 검게 변색되었음이 관찰되었다. 그림 9에 열화하기 직전과 직후에 수행한 반복 퀘칭 시 초전도 선재에 발생한 기포를 보여주는 사진을 나타내었다. 열화하기 전에는, 위에서 보인 안정적인 시편에서와 같이, 기포가 고르게 발생한 데 비해, 열화한 후에는 선재 일부의 표면이 검게 변색하였으며 퀘칭 시 변색한 부분에서만 기포가 관찰되었다. 이 현상을 이해하기 위해 그림 10에 열화하기 직전과 직후에 수행한 반복단락 실험 시 초전도 선재에 발생한 저항을 비교하였다. 열화 전에는 저항이 서서히 증가하여 2주기 후에 약 27 mΩ이 된 데 반해, 열화 후에는 저항이 열화 전에 비해 급격히 증가하여 2주기 후에 약 35 mΩ이 되었다. 이는 선재의 평균온도가 상온보다 높았다는(약 350 K) 것을 의미하는데, 열화된 부분에서만 기포가 발생한 것으로 보아 열화된 부분의 온도는 더 높았을 것으로 추정된다. 위 측정 결과와 관찰 결과를 볼 때 열화가 점진적으로 일어나지 않고 급격히 일어난 것으로 판단된다. 그리고 과열이 열화의 원인은 아닌 것으로 판단된다. 열화되기 전에 6.7 V/m 이상의 전압을 인가하지 않았으며 퀘칭이 고르게 분포하였던 점을 고려하면 과열에 의해 열화가 일어났다고 보기 어렵다 [3,10]. 반복 퀘칭 후에도 퀘칭 특성을 유지한 앞의 경우와의 차이점은 앞에서는 일련의 반복 퀘칭 실험 동안 액체 질소 내에 있었던 데 반해 열화된 시료는 실험하면서 액체

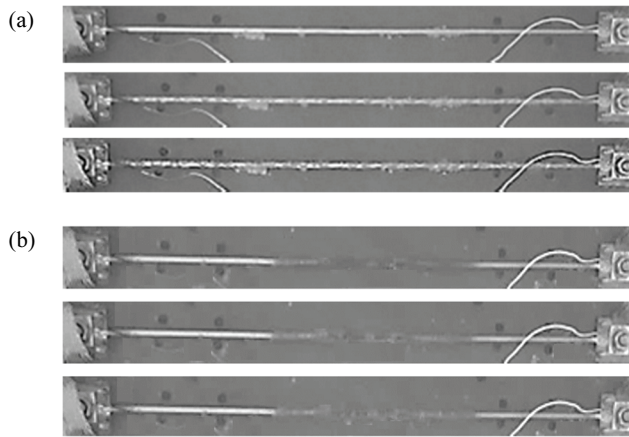


Fig. 9. Images of bubbles generated on GBCO tapes (a) before and (b) after tape degradation. The top, the middle and the bottom figures show the image before, at, and two cycles after the quench start, respectively. The applied voltage was 6.7 V/m.

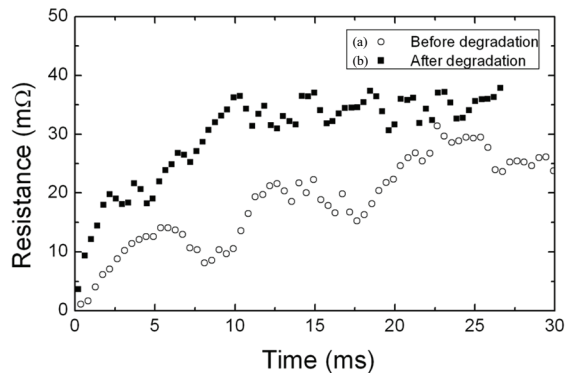


Fig. 10. Resistance developed in a coated conductor tape (a) before and (b) after tape degradation. The applied voltage was 6.7 V/m.

질소 온도로의 냉각과 상온으로의 승온을 반복하여 열순환을 겪었다는 점이다. 이 점이 영향을 미쳤을 것으로 생각되나 추가 연구가 필요하다.

4. 결론

반복 단락 조건 하에서 황동 안정화재를 가진 GBCO 초전도 선재의 퀘치 특성을 측정 분석하여 초전도 선재의 내구성을 측정하였다. 퀘치 저항 측정과 퀘치 시 발생하는 기포 관찰 결과, 50회 반복단락 후에 초전도 선재의 퀘치 특성이 유지되었으며 고르게 퀘치 하는 것으로 나타났다. 다양한 인가 전압에서 각각 50회 반복 단락 실험 후에도

퀘치 특성이 유지되었다. 초전도 선재의 이러한 내구성은 초전도 선재에 저항이 고르게 발생하는 데서 오는 열적 안정성이 기여했다고 판단된다. 선재가 열화한 경우도 있었는데 열화되기 전에는 퀘치 특성이 안정적이었으나 열화 후 국소적으로 퀘치하였다. 열화는 급격하게 일어났으며, 열화의 원인은 과열이 아니라고 판단되며 추가 연구가 필요하다.

ORCID

Bong-Man Ahn

<https://orcid.org/0000-0001-7460-3742>

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2019년 착수 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R19XO01-33).

REFERENCES

- [1] P. Tixador, *Superconducting Fault Current Limiter* (World Scientific, New Jersey, 2019) ch. 11-15.
- [2] J. Yoo, *Electricity Almanac* (Korea Electric Assoc., Seoul, 2019) p. 921.
- [3] M. C. Ahn, B. Y. Seok, and T. K. Ko, *Prog. Supercond. Cryog.*, **9**, 26 (2007).
- [4] H. I. Du, T. M. Kim, B. S. Han, G. H. Hong, and S. C. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25**, 5602404 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2377127>]
- [5] Y. Xu, G. Chen, T. Feng, Z. Cai, Y. Yue, L. Ren, S. Liang, J. Li, J. Shi, and Y. Tang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30**, 8000310 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2965923>]
- [6] G. H. Hong, H. I. Du, and B. S. Han, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 625 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.10.625>]
- [7] R. F. Barron, *Cryogenic Heat Transfer* (Taylor and Francis, Philadelphia, 1999) p. 160.
- [8] T. Rubeli, D. Colangelo, B. Dutoit, and M. Vojenciak, *Prog. Supercond. Cryog.*, **17**, 10 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.9714/psac.2015.17.1.010>]
- [9] H. R. Kim, C. R. Park, S. W. Yim, S. D. Yoo, S. Y. Oh, and O. B. Hyun, *Prog. Supercond.*, **10**, 149 (2009).
- [10] A. L. Mbaruku, U. P. Trociewitz, X. Wang, and J. Schwartz, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 3044 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898874>]