대형회전기기응용을 위한 GdBCO 레이스트랙형 팬케이크 코일의 퀜치 발생과 전파특성에 관한 연구

A Study on the Quench Initiation and Propagation Characteristics in GdBCO Racetrack Pancake Coil for Large-Scale Rotating Machines

양동규[1], 송정빈[1], 김광록[1], 권오준[1], 이우승[3], 고태국[4], 이해근[2,*]

D. G. Yang[1], J. B. Song[1], K. L. Kim[1], O. J. Kwon[1], W. S. Lee[3], T. K. Ko[4] and H. G. Lee[2,*]

Abstract: The stability issue of high temperature superconducting (HTS) racetrack coils is one of the most important factors for the development of large-scale rotating machines, such as ship propulsion motors and power generators. However, The stability and normal zone propagation characteristics of HTS racetrack pancake (RP) coils are not sufficient yet. In this study, quench tests for a GdBCO racetrack pancake coil were carried out under the condition of LN_2 at 77 K. Minimum quench energy and two-dimensional normal zone propagation velocities of the coil are also discussed. Normal zone propagation velocity in the coil's curved section is faster than in its straight section due to stress effects. The test results show that the protection of the straight section is of greater importance than that of the curved section when GdBCO racetrack pancake coils are applied to large-scale rotating machines.

Key Words: quench, GdBCO, HTS racetrack coil, normal zone propagation velocity

1. 서 론

일반적으로 고온 초전도체(HTS)를 사용한 레이스트랙 형상의 회전자를 사용하면 기존 상전도 모터보다 소형화가 가능하며 에너지 효율이 우수하다는 장점이 있다. 초전도 코일은 동작 중 줄열로 인한 손실이 거의 없고 높은 전류밀도를 가지므로 기존 코일에 비해 큰 자기장을 얻기에 용이하기 때문이다. 따라서 직류 동기모터와 풍력발전 분야로의 적용을 목적으로 HTS 레이스트랙형 코일의 개발을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4].

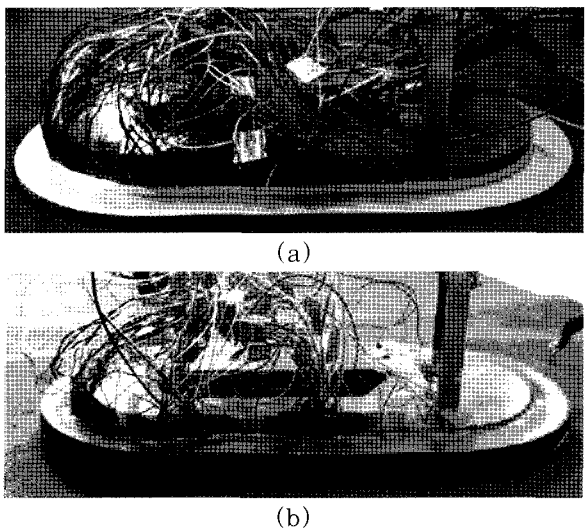
냉매의 불균일한 대류로 인해 발생하는 국소적인 열요동이 영구적으로 코일에 손상을 줄 수 있으므로 대형회전기기에 적용을 위해 HTS 레이스트랙형 코일의 안정화 및 보호 기술은 코일 설계 및 제작에 있어서 매우 중요한 요소이다. 저온초전도 (LTS) 코일의 경우 normal zone propagation(NZP)이 빠르기 때문에 열에너지의 분산을 야기하여 자체적으로 보호가 가능하지만, NZP 속도가 느린 HTS 코일에서는 이러한 손상 요인에 매우 취약하다. 그러므로 대형회전기기의 최적 설계와 제작을 위해서는 HTS 레이스트랙형 코일의 퀜치 발생과 전파에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다[5-8].

최근에 HTS 코일의 퀜치 및 회복특성에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있지만, 2세대 (2G) 초전도 선재를 사용한 HTS 레이스트랙형 팬케이크 (RP) 코일에 대한 열적, 전기적 안정성에 대한 추가 연구가 요구된다[2,9-12]. 따라서 본 연구에서는 GdBCO coated conductor (CC) RP 코일의 직선구간과 곡선구간에서의 퀜치 발생과 전파 특성에 관한 연구를 실시하였다.

2. 실 험 방 법

2.1. 코일 제작

표 1은 본 연구에서 사용한 GdBCO coated conductor (CC) 선재의 사양을 요약한 것이다. 기판-완충층-초전도층 (GdBCO)의 순서로 다층구조를 이루고 있고, 이 주변을 구리(Cu) 안정화재층이 감싸고 있다. 안정화재층 양면에는 납(Pb)층이 붙어있고, 그 위에 황동(Brass)으로 lamination 되어있다.



(a)

(b)

Fig. 1. The GdBCO RP coil (a) before and (b) after epoxy coating.

[1]학생회원 : 고려대학교 신소재공학과
[2]정 회 원 : 고려대학교 신소재공학과
[3]학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과
[4]정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과
*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr
원고접수 : 2011년 09월 02일
심사완료 : 2011년 09월 22일
게재확정 : 2011년 09월 23일

Table 1. Specifications of the GdBCO CC tape.

Parameters	Values
제조회사	SuNAM
두께	190 (μm)
너비	4.12 (mm)
Lamination 재료	황동
Lamination 두께	80 (μm)
납층 두께	30 (μm)
안정화재층 재료	구리
안정화재층 두께	20 (μm)
완충층 두께	0.085 (μm)
GdBCO층 두께	0.9 (μm)
기판 재료	하스텔로이
기판 두께	60 (μm)

Table 2. Specifications of the RP coil.

Parameters	Values
총 선재 길이	4.402 (m)
턴 수	7
곡선구간의 내경	60 (mm)
곡선구간의 외경	63 (mm)
직선구간의 길이	120 (mm)
코일 상수	0.044 (mT/A)
턴 간 절연 물질	Nomex
절연 물질 두께	0.025 (μm)
에폭시 두께	20 (mm)

표 2는 제작한 레이스트랙형 팬케이크 (RP) 코일의 사양을 보여준다. 직선구간의 길이가 120 mm이고 곡선구간의 외경이 60 mm 인 fiber-reinforced bakelite 보빈에 GdBCO CC 선재를 dry-winding 방식으로 총 7턴 권선하여 코일을 제작하였다. RP 코일의 곡선부분의 내경과 외경은 각각 60, 63 mm 이며, 퀜치 실험 시 RP 코일과 액체질소간의 열 교환을 최소화하기 위해 20 mm의 두께로 에폭시(Stycast 2850FT)를 RP 코일의 표면에 도포하였다. 턴 간 절연은 Nomex 테이프을 사용했고, 코일 상수는 0.044 mT/A였다. 그림 1은 GdBCO RP 코일의 에폭시 함침 전/후 사진을 보여준다.

2.2. 계측 방법

그림 2는 각각 직선구간과 곡선구간의 전압단자 (VT), 열전대 (TC), 히터의 배열을 간략하게 나타낸 것이다. RP 코일 내부에 국소적으로 열을 생성해주기 위해 0.0483 Ω의 저항을 갖는 U자 모양 히터 (Ni-Cr) 두개를 4번과 5번 턴 사이의 곡선 구간과 직선 구간에 각각 설치하였다. 퀜치 실험 중 전압과 온도를 측정하기 위해서, 22개의 TC와 23개의 VT를 (1) 히터 1(TC4)과 히터 2 (TC11) 부분, (2) 각 턴마다 히터 1에 수직방향 (TC1 - TC3, TC5 - TC7), (3) 각 턴마다 히터 2에 수직방향 (TC8 - TC10, TC12 - TC14), (4) 히터 1의 왼쪽 (TC15 - TC16, 20 mm 간격) 부분과 오른쪽(TC17 - TC18, 20 mm 간격) 부분, (5) 히터 2의 왼쪽(TC19 - TC20, 20 mm 간격) 부분과 오른쪽(TC21 - TC22, 20 mm 간격) 부분, (6) 10 mm 간격으로 TC1 - TC22의 양쪽 (VT1~VT22) 부분 그리고 (7) RP 코일의 양 끝단(VT23)에 설치하였다.

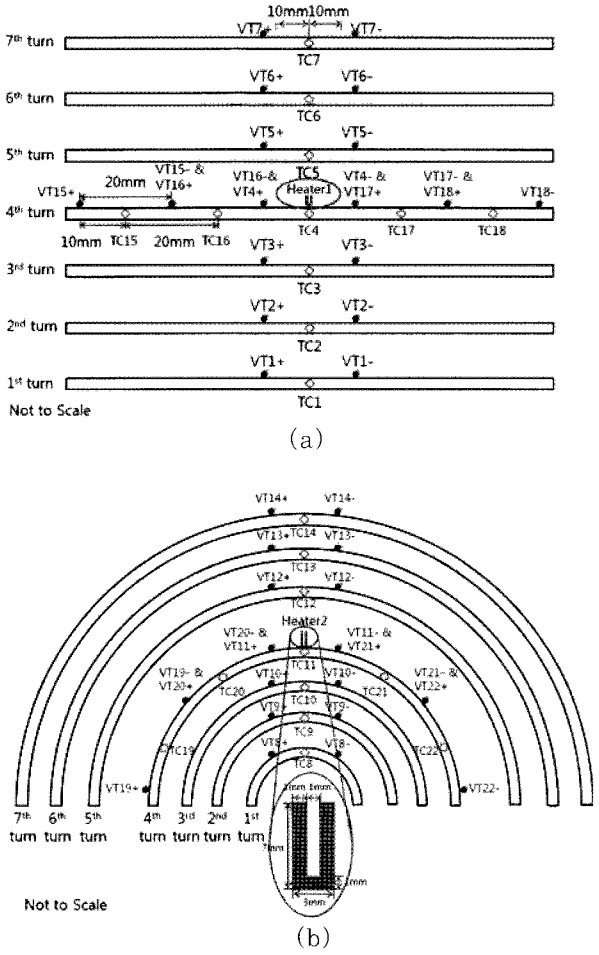


Fig. 2. The arrangements of voltage taps, thermocouples, and heaters: (a) straight section, and (b) curved section.

2.3. 퀜치 실험

모든 퀜치 실험은 77 K(액체질소온도)의 조건 하에서 수행하였으며, 임계전류(I_c)의 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 배의 다양한 운전전류(I_{op})를 코일에 가해준 상태에서 히터전류(I_h)를 500 ms 동안 흘려주어 국소적으로 열을 생성시키고, I_{op}를 I_h가 꺼진 후 약 수초 동안 유지 하였다. Minimum quench energy(MQE)를 측정하고 히터로 인해 발생하는 normal zone의 전파속도를 계산하기 위하여 I_h를 증가시키면서 이 과정을 반복적으로 수행하였다. 모든 실험의 온도와 전압을 DAQ시스템을 통하여 관찰 및 기록하였다.

2.4. 유한요소해석

Normal zone propagation (NZP)의 유한요소해석을 위해 일반적인 열에너지 평형방정식에 초전도 선재와 히터에 의해 발생하는 줄열을 표현하는 항을 추가하였으며, 이에 따른 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho_d(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T)\nabla T) + \rho(T)J^2 + Q_h + h(T_{ext} - T) \quad (1)$$

여기서 ρ_d는 밀도, C_p는 열용량, k는 열전도도, ρ는 비저항, J는 RP 코일에 흐르는 전류밀도, Q_h는 히터의 출력 밀도, h는 액체질소의 대류성 열전달계수, T_{ext}는 외부온도 (77 K), T는 온도이다. ρ_d, k는 온도에 따라 변하는 물성이지만 계산의 단순화를 위해 77 K의 값

을 사용하고 온도에 따라 변하지 않는다고 가정하였다. 권선에 사용한 GdBCO CC 선재는 일반적으로 다층박막구조를 가지기 때문에 다음과 같은 복합물성을 가지는 식들을 사용하였다.

$$\rho_{d,comp} = \frac{t_{Cu}\rho_{d,Cu} + t_{Pb}\rho_{d,Pb} + t_{Br}\rho_{d,Br} + t_{Ha}\rho_{d,Ha}}{t_{Cu} + t_{Pb} + t_{Br} + t_{Ha}} \quad (2)$$

$$C_{p,comp}(T) = \frac{t_{Cu}C_{p,Cu}(T) + t_{Pb}C_{p,Pb}(T) + t_{Br}C_{p,Br}(T) + t_{Ha}C_{p,Ha}(T)}{t_{Cu} + t_{Pb} + t_{Br} + t_{Ha}} \quad (3)$$

$$k_{comp} = \frac{t_{Cu}k_{Cu} + t_{Pb}k_{Pb} + t_{Br}k_{Br} + t_{Ha}k_{Ha}}{t_{Cu} + t_{Pb} + t_{Br} + t_{Ha}} \quad (4)$$

$$\rho_{comp}(T) = \frac{t_{Cu} + t_{Pb} + t_{Br} + t_{Ha}}{\frac{t_{Cu}}{\rho_{Cu}}(T) + \frac{t_{Pb}}{\rho_{Pb}}(T) + \frac{t_{Br}}{\rho_{Br}}(T) + \frac{t_{Ha}}{\rho_{Ha}}(T)} \quad (5)$$

여기서 아래첨자 *comp*, *Cu*, *Pb*, *Br*, *Ha*는 각각 복합물성, 구리, 납, 황동, 하스텔로이를 뜻하고 *t*는 그들의 두께를 의미한다. 초전도 선재의 복합물성의 계산에 있어서 초전도층과 완충층은 두께가 상대적으로 매우 얇기 때문에 계산식에는 포함하지 않았고, 열전도도의 경우에는 비등방성 열전도도를 가지고 있지만, 곡선부분에서의 계산의 단순화를 위하여 열전도도가 등방성이라고 가정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. Minimum quench energy (MQE)

퀜치 실험을 하기 전에 77 K에서 RP 코일의 I_c를 측정한 결과, 1 μm/cm을 기준으로 102 A이였다. I_{op}/I_c를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8로 증가시키면서 측정한 MQE 값은 각각 5.29, 3.59, 2.61, 2.06 J로 (그림 3) I_{op}/I_c가 증가함에 따라 MQE 값들은 감소하였음을 알 수 있다.

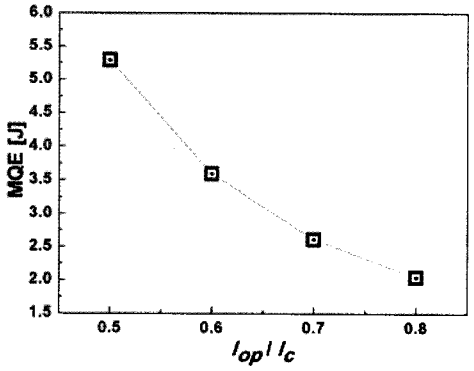
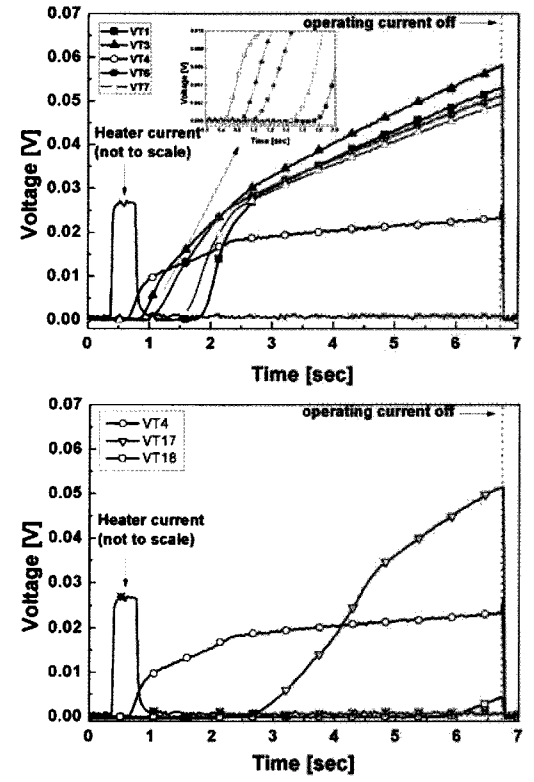


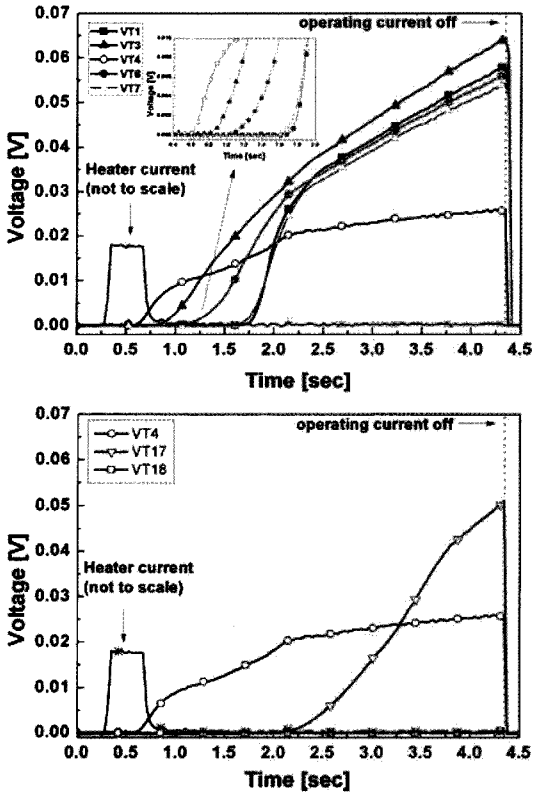
Fig. 3. Minimum quench energy (MQE) vs. I_{op}/I_c for the RP coil.

3.2. 퀜치 발생과 전파 : normal zone propagation velocities (NZPVs)

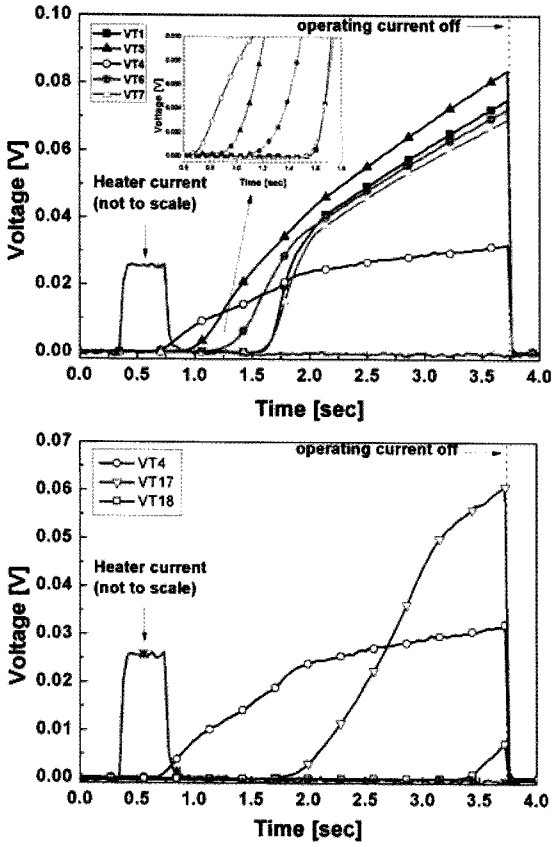
그림 4와 5는 E_h는 1.3 MQE이고 I_{op}/I_c 는 0.6, 0.7, 0.8일 때 각각 RP 코일의 직선, 곡선구간에서 얻은 전압곡선들이다. 코일의 영구적인 손상을 방지하기 위해 코일 전체 전압이 약 1.5 V에 도달할 경우 코일에 흐르는 전류를 차단시켜 주었다. 그림 4와 5를 보면 I_{op}가 증가할수록 선재에서 발생하는 줄열 자체도커지기 때문에 퀜치가 전파되는 속도가 빨라지며, 각각의 VT에서 측정되는 전압의 크기도 커진다는 것을 알 수 있다. 동일한 조건에서 곡선구간과 직선구간의 그래프를 비교해 보면, 곡선구간에서 퀜치가 전파되는 속도가 직선구간보다 빨랐고 각각의 VT에서 측정되는 전압의 크기는 직선구간이 곡선구간보다 크게 나타났다.



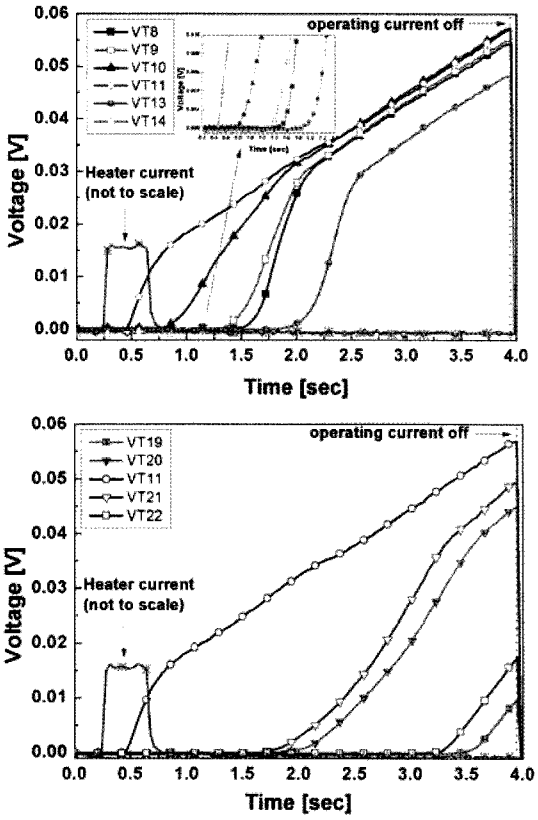
(a)



(b)

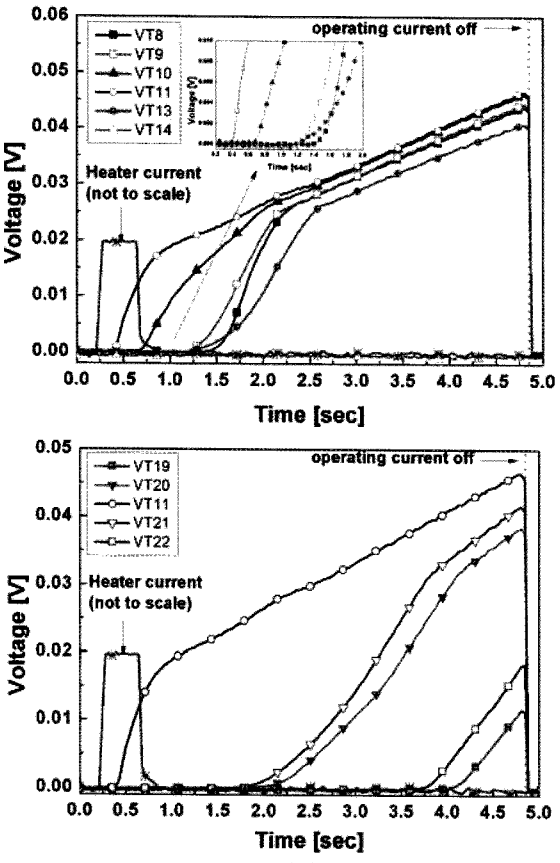


(c)

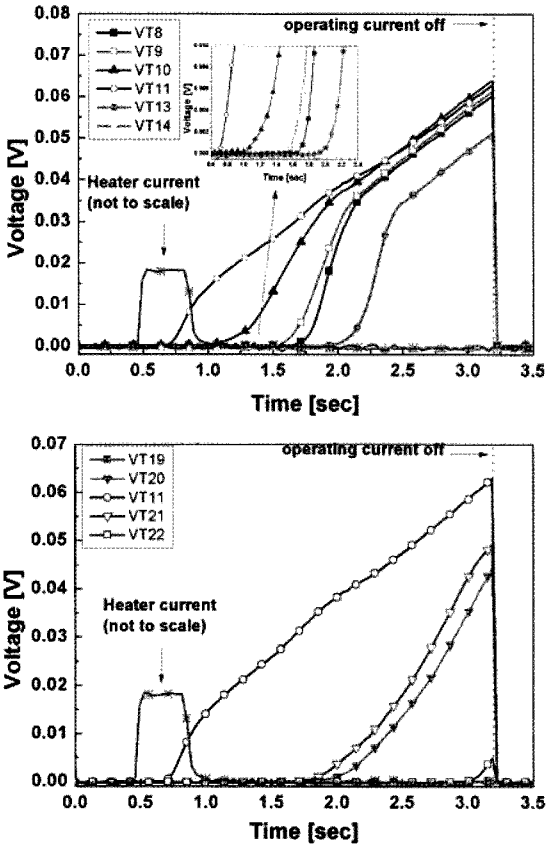


(b)

Fig. 4. Voltage traces of the straight section of the RP coil during quench testing with E_h = 1.3 MQE and I_{op}/I_c = (a) 0.6, (b) 0.7, and (c) 0.8.



(a)

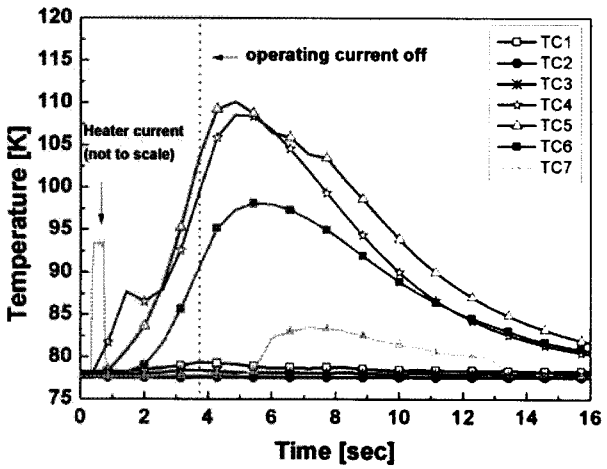


(c)

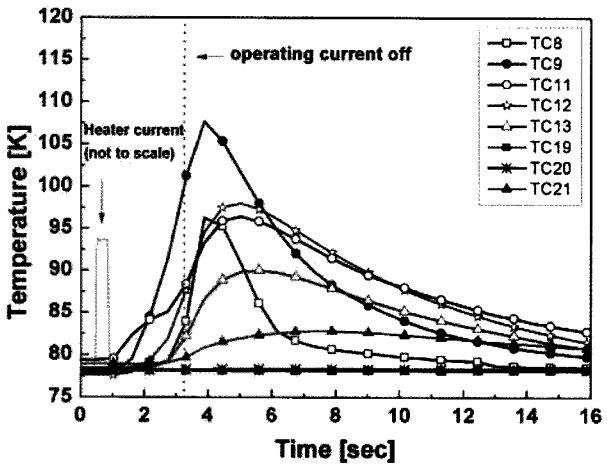
Fig. 5. Voltage traces of the curved section of the RP coil during quench testing with E_h = 1.3 MQE and I_{op}/I_c = (a) 0.6, (b) 0.7, and (c) 0.8.

그림 6은 E_h = 1.3 MQE이고 I_{op}/I_c = 0.8일 때의 퀜치 실험을 통해 측정한 RP 코일의 시간에 따른 온도 그래프이다. 그림 6을 보면 히터 주변의 온도들이 높은 것을 알 수 있으며, 전체적인 온도그래프의 양상은 전압그래프(그림 4, 5)와 유사하지만 온도는 전압과는 달리 I_{op}가 차단된 후에도 수 초간 증가한 후에 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 E_h = 1.3 MQE, I_{op}/I_c = 0.6, 0.7, 0.8에서 수행된 퀜치 실험을 통해 계산된 NZPV 값들을 보여준다. I_{op}/I_c가 증가함에 따라 NZPV는 증가하였으며, longitudinal normal zone propagation ($NZPV_L$)이 transverse normal zone propagation ($NZPV_T$)보다 빠르게 나타났다. 또한 곡선구간에서의 NZPV는 직선구간에서의 보다 빨랐으며, 특히 $NZPV_L$의 경우 곡선구간에서 직선구간보다 거의 2배정도 빨랐다. 이는 권선 중에 곡선구간에 걸리는 응력에 기인하기 때문으로 보인다. 일반적으로 곡선구간에서는 직선구간보다 더 큰 곡률로 인해 권선 중에 코일의 안쪽방향으로 더 큰 응력이 야기되는데[13], 이러한 응력으로 인해 턴 간에 밀착이 잘 되어, 결국에는 곡선구간은 국소적으로 발생되는 열들이 더욱 쉽게 분산될 수 있다[14-15]. 그러므로 레이스트랙 형상의 GdBCO 팬케이크 코일을 대형 회전기기에 응용을 할 시에는 곡선구간보다 직선구간의 보호에 더 많은 노력을 기울여야 할 것으로 본다.

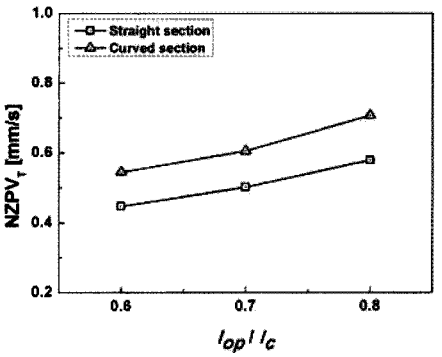


(a)

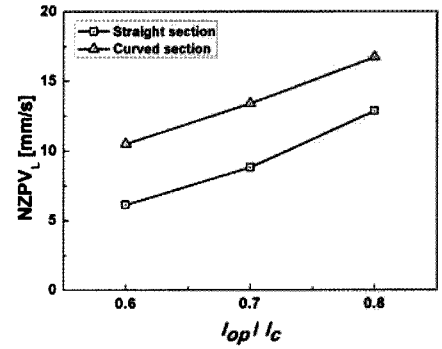


(b)

Fig. 6. Temperature-time plots of the RP coil during quench testing with E_h = 1.3 MQE and I_{op}/I_c = 0.8: (a) straight and (b) curved sections.



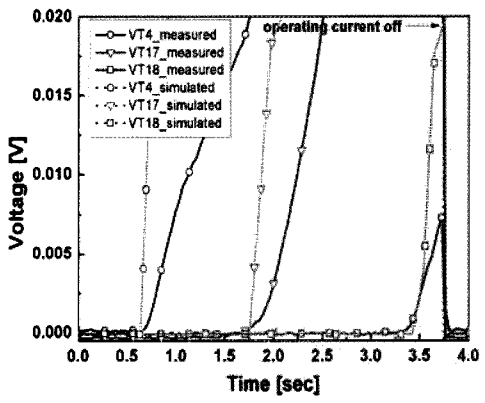
(a)



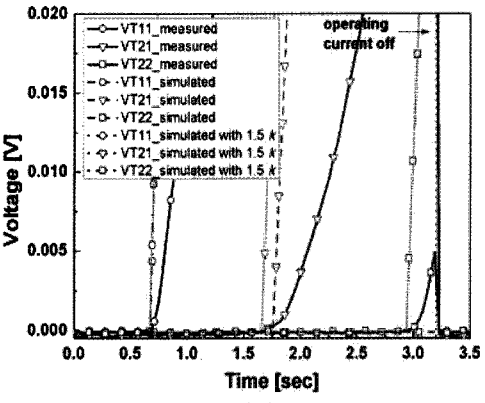
(b)

Fig. 7. (a) Transverse and (b) longitudinal NZPVs of the RP coil with respect to I_{op}/I_c.

3.3. 퀜치 발생과 전파 : 유한요소해석



(a)



(b)

Fig. 8. Experiment and simulation results for V(t) traces of the RP coil at E_h = 1.3 MQE, I_{op}/I_c = 0.8: (a) straight section, and (b) curved section.

NZP특성의 차이가 확연하게 드러나는 longitudinal NZP의 유한요소해석결과를 E_h = 1.3 MQE, I_{op}/I_c = 0.8 일 때 직선구간과 곡선구간의 실험결과들과 비교해보았다 (그림 8). 이 때 해석은 앞서 언급했던 지배방정식을 사용했으며, 선재와 턴간 절연물질(Nomex tape)을 같이 모델링함으로써 longitudinal과 transverse방향으로의 열전달이 실제와 유사하게 나타날 수 있도록 하였다. 또한 정확한 냉각조건을 위해 선재의 주변에 보빈과 에폭시를 같이 모델링하였다. 직선구간에서의 결과를 보여주는 그림 8(a)에서 전압이 증가하는 시간을 살펴보면 실험결과(실선)와 해석결과(점선)가 잘 부합하는 것을 알 수 있는 반면, 곡선구간인 그림 8(b)를 보면 실험결과(실선)와 해석결과(파선)가 잘 부합하지 않았다. 따라서 곡선구간의 열전도도를 1.5배 증가시켜서 해석을 수행하였으며 그 해석결과는 동일한 그림에서 점선으로 나타내었다. 곡선 부분에서의 열전도도를 1.5배 증가시켜 해석한 결과는 실험결과와 잘 부합되었으며, 이는 권선 중에 야기되는 응력에 의해 코일의 턴 간 밀착이 잘 되어 NZP에 영향을 끼치고 있는 것을 확인해 주는 결과라고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형회전기기응용을 위해 GdBCO coated conductor를 이용하여 제작한 레이스트랙형 팬케이크 (RP) 코일에서의 퀜치 발생과 전파 특성에 대해 조사하였다. 임계전류에 대한 작동전류가 임계전류 값의 0.5, 0.6, 0.7, 0.8일 때 측정한 RP 코일의 minimum quench energy (MQE) 값들은 각각 5.29, 3.59, 2.61, 2.04 J이였다. 곡선구간의 normal zone propagation(NZP)은 직선구간보다 빨랐으며, 특히 응력 효과로 인해 곡선구간의 longitudinal NZP는 직선구간보다 2배 가량 빠르게 나타났다. RP 코일의 곡선구간에서 응력의 증가는 턴 간 밀착을 야기하고, 결국 국소적으로 발생되는 열들이 비교적 쉽게 제거 될 수 있었음을 알 수 있었다. 결론적으로, 레이스트랙 형상의 GdBCO 팬케이크 코일을 대형회전기기에 적용할 경우 곡선구간보다 직선구간의 보호가 더욱 더 중요할 것으로 판단되었다. 또한 레이스트랙 형상 코일의 직선구간 보호를 위해 응력이 NZP에 미치는 영향에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 중견연구자사업인 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No.2009-0085369)의 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 유한요소해석에 도움을 주신 한전전력연구원의 김우석 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] T Nakamura, "Progress of HTS rotating machine development in Japan", Superconductivity and Cryogenics, vol. 13, 1-4, 2011.

[2] H M Kim, Y K Kwon, J D Lee, J B Song, H G Lee, "Quench and recovery characteristics of a racetrack double pancake coil wound with YBCO-coated conductor", Supercond. Sci. Technol., vol. 22, 025014, 2009.

[3] T Okazaki, H Sugimoto, T Takeda, "Liquid Nitrogen Cooled HTS Motor for Ship Propulsion", IEEE Power Eng. Soc. General Mtg., 1 - 6, 2006

[4] M Iwakuma, Y Hase, T Satou, A Tomioka, M Konno, Y Iijima, T Saitoh, Y Yamada, T Izumi, Y Shiohara, "Production and test of a ReBCO superconducting synchronous motor", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no.3, 1648-1651, 2009.

[5] J W Lue, L Dresner, S W Schwenterly, D Aized, J M Campbell, R E Schwall, "Stability measurements on a 1-T High temperature superconducting magnet", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.. 5, no. 2, 230 - 233, 1995.

[6] W S Kim, F Trillaud, M C Ahn, Y Iwasa, X Peng, M Tomsic, "Normal Zone Propagation in 2-Dimensional YBCO Winding Pack Models", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, 1249-1252, 2008.

[7] W S Kim, F Trillaud, I C Ang, S Y Hahn, Y Iwasa, "Normal zone propagation in YBCO winding pack models", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, 2478 - 2481, 2007.

[8] Y Iwasa, "Stability and Protection of Superconducting Magnets-A Discussion", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, 1615 - 1620, 2005.

[9] J D Lee, Y K Kwon, S K Baik, E Y Lee, Y C Kim, T S Moon, H J Park, W S Kwon, J P Hong, M W Park, I K Yu, Y S Jo, "Thermal quench in HTS double pancake race track coil", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, 1603-1606, 2007.

[10] H Song, K Gagnon, J Schwartz, "Quench behavior of conduction-cooled $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor pancake coils stabilized with brass or copper", Supercond. Sci. Technol., vol. 23, 065021, 2010.

[11] K L Kim, J B Song J H Choi, S H Kim, D Y Koh, K C Seong, H M Chang, H G Lee, "The design and testing of a cooling system using mixed solid cryogen for a portable superconducting magnetic energy storage system", Supercond. Sci. Technol., vol. 23, 125006, 2010.

[12] D G Yang, J B Song, Y H Choi, M C Ahn, J B Na, T K Ko, H G Lee, "Quench and recovery characteristics of the Zr-doped (Gd, Y) BCO coated conductor pancake coils insulated with copper and kapton tapes", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, 2415 - 2419, 2011.

[13] S K Baik, M H Sohn, R K Ko, Y K Kwon, K S Ryu, Y S Jo, "Quench current improvement through shape modification of racetrack coil", Cryogenics, vol. 42, 1-7, 2002.

[14] P W Bridgman, "The effect of pressure on the thermal conductivity of metals", Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, vol. 57, 77 - 127, 1921.

[15] C Starr, "The Pressure Coefficient of Thermal Conductivity of Metals", Physical Review, vol. 54, 210 - 216, 1938.

저 자 소 개

양동규(梁東圭)
1984년 11월 4일생, 2010년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석·박사통합과정.

송정빈(宋廷彬)
1978년 11월 12일생, 2005년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 2007년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정.

김광록(金撗祿)
1982년 8월 18일생, 2008년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 2010년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정.

권오준(權五俊)
1988년 8월 21일생, 2011년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.

이우승(李愚丞)
1987년 2월 19일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학과 졸업, 현재 2011년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정.

고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph.D). 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.

이해근(李海根)
1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1995~1997년 MIT, FBML, 박사후과정, 1997~2006년 MIT, FBML, 연구교수, 2006~현재 고려대학교 신소재공학부 교수.