

# Increased impedance by quench at a shield layer of HTS power cable for fault current limiting function

Youngjun Choi<sup>a</sup>, Dongmin Kim<sup>a</sup>, Jeonwook Cho<sup>b</sup>, Kideok Sim<sup>c</sup>, Sungkyu Kim<sup>b</sup>, and Seokho Kim<sup>\*, a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon, 51140, Korea

<sup>b</sup> Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, 51543, Korea

<sup>c</sup> SuperGenics, Changwon, 51542, Korea

(Received 22 November 2019; revised or reviewed 17 December 2019; accepted 18 December 2019)

## Abstract

To reduce the fault current below the current capacity of a circuit breaker, researches on HTS (High Temperature Superconductor) power cables with fault current limiting (FCL) function are increasing. An FCL HTS power cable transports current with low a impedance during normal operation. Yet, it limits the fault current by an increased inductive or resistive impedance of conducting layer when quench occurs at the FCL HTS power cable by the large fault current. An inductive type FCL HTS power cable uses increased inductive impedance caused by leakage magnetic flux outside the cable core when the quench occurs at a shield layer losing the magnetic shielding effect. Therefore, it has an advantage of less resistive heating than resistive type FCL HTS power cable and temperature increase is suppressed. This paper describes an ideal circuit model for the FCL HTS power cable to investigate the effectiveness of increased inductive impedance when quench occurs at the shield layer. Then, FEM analysis is presented with a simplified model cable composed of various iron yokes to investigate the effect of the shape of yoke on the generation of the inductive impedance.

**Keywords:** fault current limiting high temperature superconductor, HTS power cable, inductive impedance, yoke

## 1. 서 론

증가하는 전력수요를 충족하기 위해 발전설비 확충과 계통 루프화를 통한 대용량화 및 계통 안정화가 이루어지고 있다 [1]. 그러나, 루프화를 통한 계통의 임피던스 감소는 사고시 고장전류의 크기를 차단기의 용량 이상으로 증가시키는 문제를 야기시키기도 한다. 이러한 고장전류를 저감하기 위해 다양한 초전도 한류기(superconducting fault current limiter)가 개발되었으며, 일부 상용구간에서 사용되고 있다 [2-7].

독립적인 초전도 한류기의 개발과 이외에도 사고시 증가하는 초전도 케이블의 임피던스를 직접 활용하여 고장전류를 제한할 수 있는 한류 고온 초전도 케이블 (FCL HTS cable)에 대한 연구가 진행되고 있다 [8, 9].

한류 고온 초전도 케이블은 정상 운전시 일반적인 고온 초전도 케이블과 동일하게 적은 손실로 대용량의 전력을 송전할 수 있으며, 별도의 냉각시스템이 필요 없이 고온 초전도 케이블 자체의 냉각시스템을 사용할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 정상운전 시에는 전력손실이 적고 낮은 전압으로 장거리 및 대용량 송전이 가능하며 고장발생 시 차단기 사용이 가능한 영역까지 전류를 제한하는 기능을 갖는 한류형 고온 초전도 전력케이블의 연구가 요구되었다 [8, 9].

한류 고온초전도 케이블은 크게 저항형과 유도형으로 구분된다. 저항형의 경우 고장전류에 의해 통전층 및 차폐층에 퀘치가 발생하면 증가된 저항에 의해 고장전류가 제한되는 방식이다. 이 경우 막대한 저항열이 발생하여

케이블 코어의 온도가 상승하고 액체질소의 기포 발생으로 절연파괴의 문제를 야기시킬 수 있다 [1].

유도형은 그림 1에서 보듯이 차폐층에서 발생한 퀘치에 의해 차폐층의 전류가 감소하게 되면 케이블 외부로 누설되는 자속의 증가로 통전층의 유도성 임피던스가 증가하고 고장전류가 제한되는 방식이다 [10, 11]. 이 경우 저항형에 비해 발열과 온도상승 문제에서 유리한 특징을 갖는다. 유도형 한류 고온 초전도 케이블의 고장전류 제한 성능은 증가된 통전층 임피던스에 의해 결정되며, 퀘치 발생 시의 차폐층 저항과 케이블 주변 매질의 자화 특성과 관련이 있다.

본 논문에서는, 고온 초전도 케이블이 직선 형태로 포설되는게 일반적이지만, 누설자속에 의한 임피던스 증가를 극대화하기 위하여 요크를 갖는 코일 형태의 권선을 제안하고자 한다. 실제 요크에 권선된 한류형 고온 초전도 케이블의 개발에 앞서, 통전층과 차폐층 역할을 하는 두

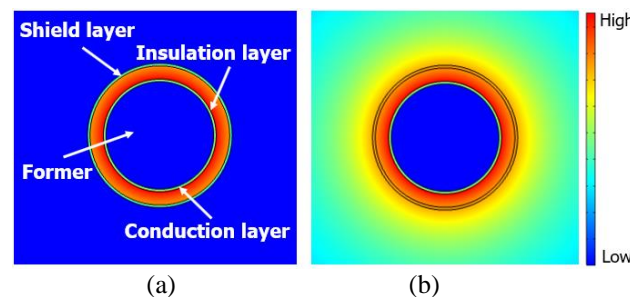


Fig. 1. Magnetic field of an inductive FCL HTS power cable during (a) normal operation and (b) fault condition.

\* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

개의 원형 코일 및 철심 요크로 구성된 소형 모델 코일을 제시하였다. 임피던스 증가를 예측하기 위하여 이상적인 회로 모델로부터 차폐층 저항과 통전층 인덕턴스의 크기 변화에 따라 사고시 증가되는 통전층의 임피던스를 예측하였으며, 실제 모델 코일의 형상을 고려한 유한요소해석(FEM)을 통하여 철심 요크의 모양에 따른 임피던스 증가 효과를 분석하였다.

## 2. 이상화된 회로 모델

### 2.1. 회로 모델

초전도 전력케이블 내 통전층과 차폐층의 전류, 전압 관계는 전자기 유도에 의해 결정되므로 변압기의 회로로 모델링이 가능하다. 즉, 차폐층에 흐르는 유도전류를 표현하기 위해 그림 2와 같은 변압기에 대한 등가회로를 고려할 수 있다. 전원이 공급되는 1차 측은 통전층으로 볼 수 있으며, 전압이 유도되는 2차 측은 차폐층으로 볼 수 있다. 차폐층의 전류는 통전층 전류와 위상이 반대이므로  $I_2$  대신  $-I_2$  대입하면 1차측과 2차측 인덕터의 전압  $V_1$ 과  $V_2$ 에 대해서 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 \quad (1)$$

$$V_2 = j\omega M I_1 - j\omega L_2 I_2 \quad (2)$$

여기서  $L_1, L_2, M, \omega$  는 각각 통전층 인덕턴스, 차폐층 인덕턴스, 상호 인덕턴스 및 주파수이다. 키르히호프 법칙에 의해 2차측의 폐루프에 대해서 식 (3)과 같이 표현된다.

$$0 = -j\omega M I_1 + (j\omega L_2 + R_s) I_2 \quad (3)$$

식 (3)을 차폐층 전류와 통전층 전류비로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{j\omega M}{j\omega L_2 + R_s} \quad (4)$$

여기서  $R_s$  는 퀘칭시 발생하는 차폐층의 저항이다. 또한, 초전도 케이블의 통전층에 해당하는 1차측 인덕터의 임피던스는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_L = \frac{V_1}{I_1} = j\omega L_1 - j\omega M \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

여기서  $Z_L$  은 통전층의 임피던스이며, 식 (5)에 식 (4)를

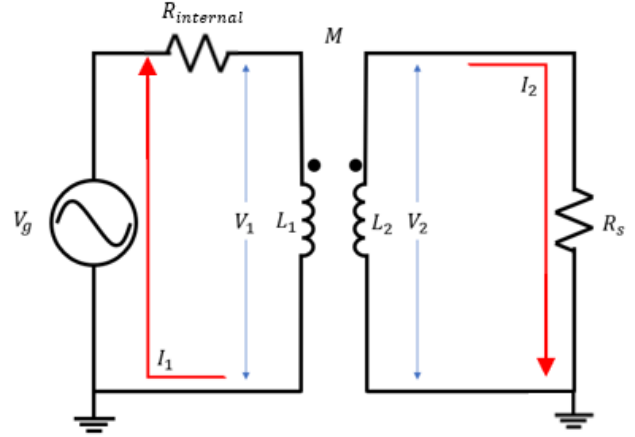


Fig. 2. Equivalent transformer circuit of HTS power cable.

대입하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_L = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_s} \quad (6)$$

이상적인 케이블에서는 통전층과 차폐층 간 거리가 매우 가깝고 형상이 유사하므로  $L_1, L_2, M$  는 같다고 가정하고 식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같이 통전층의 임피던스를 인덕턴스와 차폐층 저항의 관계로 표현할 수 있다.

$$Z_L = j\omega L + \frac{\omega^2 L^2}{j\omega L + R_s} \quad (7)$$

통전층이 갖는 임피던스의 크기는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$|Z_L| = \frac{R_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L}\right)^2}} \quad (8)$$

## 3. 모델 케이블의 FEM 해석 모델

### 3.1. FEM 해석 모델 형상

실제와 같이 직선으로 배치된 초전도 케이블에서는 차폐층의 퀘칭이 발생하더라도 누설된 자기장에 의해 통전층의 유도성 임피던스 증가가 크지 않기 때문에 그림 3과 같이 내부 요크에 코일 형태로 권선된 초전도 케이블을 고려하여 사고시 유도성 임피던스가 크게 증가할 수 있도록 구성하였다.

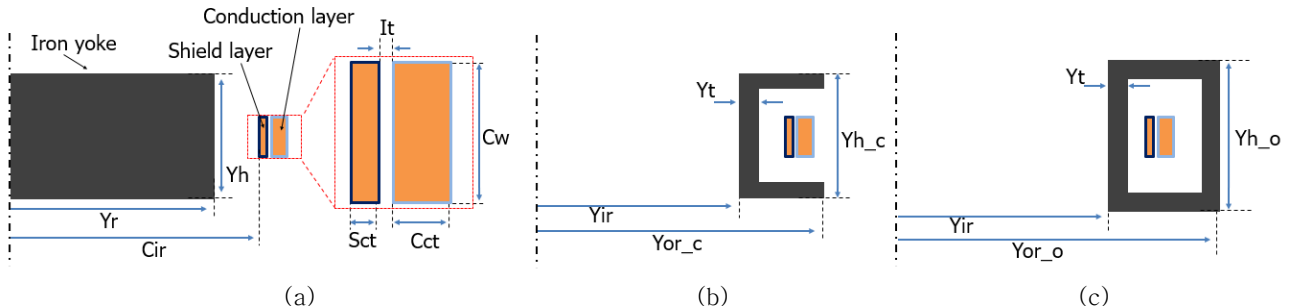


Fig. 3. Schematic diagram of (a) I type iron yoke (b) C type iron yoke (c) O type iron yoke analysis model.

TABLE I  
 SPECIFICATION OF ANALYSIS MODEL.

Parameter	Value
Conduction coil [layer/turn]	1 / 10
Shield coil [layer/turn]	1 / 10
Conduction coil thickness (Cct) [mm]	2.8
Shield coil thickness (Sct) [mm]	1.4
Coil width (Cw) [mm]	4
Insulation thickness (It) [mm]	0.1
Coil inner radius (Cir) [mm]	100
Iron yoke radius (Yr) [mm]	80
Iron yoke height (Yh) [mm]	50/100/150
Iron yoke thickness (Yt) [mm]	10
Iron yoke inner radius (Yir) [mm]	70
C type iron yoke outer radius (Yor_c) [mm]	110
C type iron yoke height (Yh_c) [mm]	80
O type iron yoke outer radius (Yor_o) [mm]	130
O type iron yoke height (Yh_o) [mm]	70

해석을 진행하기 위하여 FEM 상용해석 프로그램인 ‘Comsol Multiphysics’의 2D 축대칭 모델을 사용하였다. 그림 3은 본 논문에서 수행한 세 종류의 요크를 적용한 해석 모델의 개략도이며 중요 치수는 표 1에 나타내었다. 상세 형상은 실험을 통한 검증용 모델의 크기를 고려하였다.

인덕턴스는 크기 및 모양과 같은 회로의 구조와 주위 매질의 자기적 성질에 의존하는 성분이다. 따라서 권선수와 층수를 늘릴수록, 코일의 단면적이 클수록, 주위 매질의 투자율이 클수록 인덕턴스가 증가한다. FEM 해석에서는 주위 매질의 자기적 성질을 바꾸기 위해 철심의 형상과 배치를 달리하였고 철심의 자기적 성질은 AISI1020의 B-H 곡선을 사용하였다.

### 3.2. 해석 조건

이 해석 결과는 향후 실제 실험을 통하여 검증할 계획이므로 사용될 초전도 선재의 임계전류를 고려하여 1차측 전압을  $4.3 V_{peak}$ 로 고정하였다. 또한, 전자장 해석 모듈에 회로 모듈을 추가하여 내부저항  $1 m\Omega$ 과 부하저항  $50 m\Omega$ 을 적용하였다. 즉, 정상운전시는 부하저항이 적용되도록 하였고, 사고시에는 부하저항을 제거하고 내부저항  $1 m\Omega$ 만 적용하여 한류 기능이 없을 경우 최대 고장전류가  $4.3 kA_{peak}$ 가 되도록 설정하였다.

본 해석 모델에서는 통전층의 경우 초전도 선재와 병렬 연결된 구리 포머가 있으므로 저항을 무시하였으며, 차폐층의 경우 초전도체의 비선형 E-J 관계식 대신에 해석의 편의성을 고려하여 고장 전류 유입시 저항이 순간적으로  $34 m\Omega$ 이 되도록 설정하였다. 이 저항값은 실제 실험에서 사용될 차폐층 초전도 선재 길이 6.4 m의 웬치시 저항 값이다.

## 4. 회로 해석 및 FEM 해석 결과

### 4.1. 회로 해석에 의한 임피던스 결과

그림 4는 식 (8)로부터 계산된 인덕턴스와 차폐층 저항에 따른 통전층의 임피던스 값이다. 인덕턴스가 증가함에 따라 통전층 임피던스는 차폐층의 저항으로

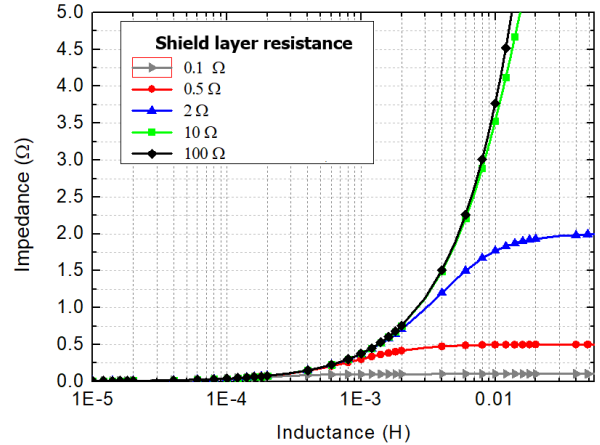


Fig. 4. Calculated impedance of conducting layer when fault current is introduced.

수렴하며 저항이 커질수록 통전층 임피던스는 유도성 임피던스에 수렴한다. 실제 유도형 한류 케이블에서 인덕턴스는 케이블의 권선 턴수 및 요크의 형상에 따라 결정되며, 차폐층의 저항은 차폐층으로 사용되는 초전도 선재의 구성물질에 따라 달라진다. 즉, 초전도 선재의 안정화층을 얇게 하거나, 비저항이 큰 물질을 사용하게 되면,  $R_s$ 가 증가하게 된다 [10].

### 4.2. FEM 해석결과

표 2는 그림 3의 해석 모델에 대하여 계산된 통전층, 차폐층 및 상호 인덕턴스이다. 코일 주위에 철심이 없는 경우보다 투자율이 높은 철심이 있을 때 각각의 인덕턴스가 더 컸으며 철심의 높이가 커질수록 인덕턴스가 증가하였다. 또한 코일을 감싸는 형상일수록 인덕턴스가 증가하는 경향을 보인다.

그림 5는 정상운전 이후 0.05초에 사고가 발생하였을 경우에 대한 해석 결과의 예시로 차폐층에 웬치가 발생하지 않은 해석 모델과 O형 철심 및 사고시 차폐층 웬치에 의한 저항을 적용한 해석 모델의 전류 변화를 비교한 결과이다.

사고시에도 차폐층에 웬치가 발생하지 않는다면 자기차폐가 이루어져 정상운전시와 같은 낮은 임피던스를 유지하기 때문에 고장전류를 제한하지 못한다. O형 철심 및 사고시 차폐층 웬치에 의한 저항을 적용한 경우 정상운전시에는 차폐층 웬치가 발생하지 않음으로 낮은

 TABLE II  
 CONDUCTION LAYER, SHIELD LAYER, MUTUAL INDUCTANCE OF ANALYSIS MODEL.

	Inductance [ $\mu H$ ]		
	$L_1$	$L_2$	$M$
No quench shield layer	49.05	49.52	44.15
w/o shield layer	49.01	-	-
w/o iron yoke	49.05	49.52	44.15
I type iron yoke (Yh = 50 mm)	60.48	62.02	50.61
I type iron yoke (Yh = 100 mm)	72.40	74.38	68.24
I type iron yoke (Yh = 150 mm)	81.80	83.93	77.71
C type iron yoke	109.0	115.8	107.1
O type iron yoke	6184	6185	6179

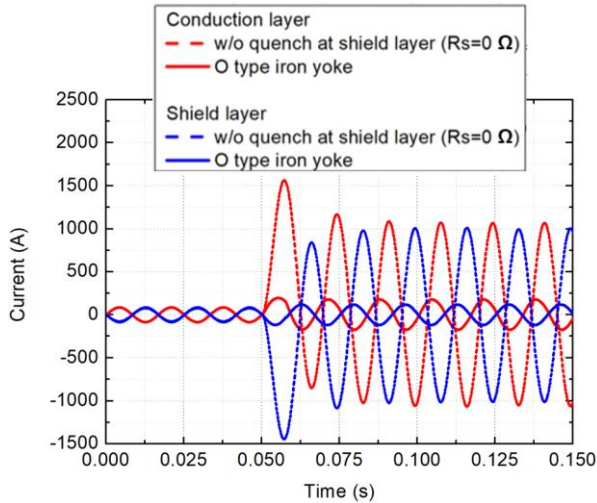


Fig. 5. Current transition by fault at  $R_s = 0 \Omega$  and O type iron yoke.

임피던스를 유지하지만, 사고시 차폐층에 퀘칭에 의한 저항이 발생하여 고장전류를 제한함을 확인하였다. 이는 차폐층에 퀘칭으로 인한 저항이 발생하여 누설된 자기장에 의해 유도성 임피던스가 증가하였기 때문이다. 해석모델의 내부저항  $1 \text{ m}\Omega$ 과 전원측 전압  $4.3 \text{ V}_{\text{peak}}$ 을 고려하면 최대 고장전류의 크기는  $4.3 \text{ kA}_{\text{peak}}$ 로 예상되나, 차폐층 퀘칭이 발생하지 않더라도 차폐층 전류가 100% 유도되지 않아

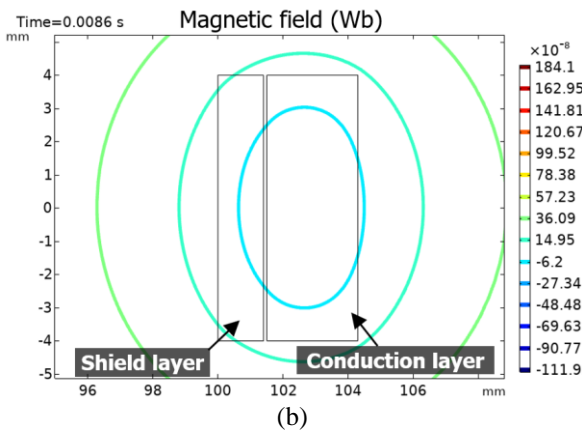
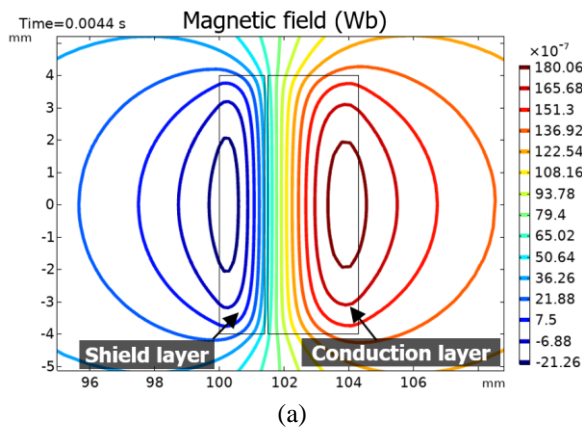


Fig. 6. Magnetic flux streamlines during (a) normal operation and (b) fault condition.

누설되는 자기장에 의한 임피던스에 의해  $1194 \text{ A}_{\text{peak}}$ 의 고장 전류가 발생하는 것으로 해석되었다. 그러나, 차폐층의 퀘칭을 고려할 경우 고장 전류는 다시  $177 \text{ A}_{\text{peak}}$ 로 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 O형 철심을 적용한 해석모델의 정상운전 시와 고장발생 시의 자기장 분포를 나타낸 그림이다. 정상운전 시의 자기장 분포를 살펴보면 통전층에서 발생하는 자기장이 차폐층에 의해서 대부분에 차폐되는 것을 확인할 수 있다.

고장발생 시의 자기장 분포를 살펴보면 통전층에서 발생하는 자기장이 차폐층에 쇄교하지 않고 외부로 누설되는 것을 확인할 수 있다. 이는 고장전류로 인해 차폐층에서 퀘칭이 발생하고 자기차폐 기능을 상실한 것을 의미한다.

#### 4.3. 회로모델과 FEM 해석 결과 비교

차폐층 저항이  $34 \text{ m}\Omega$ 일 경우 식 (8)의 회로 이론식과 그림 3의 FEM 해석모델들에서 계산된 통전층의 임피던스 값을 비교하였다. 그림 7에서 보듯이 정상 운전시 퀘칭이 발생하지 않은 차폐층에 의해  $3.6 \text{ m}\Omega$  정도의 낮은 임피던스가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 고장전류에 의한 차폐층 퀘칭과 철심의 배치에 따라 통전층의 임피던스는  $16 \text{ m}\Omega$ 에서  $23 \text{ m}\Omega$ 까지 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 사고시 통전층의 임피던스는 정상운전시에 비해 최대 6.4 배 증가하였다.

차폐층이 없는 경우에는 통전층이 가지는 인덕턴스 성분이 모두 고장전류를 제한하므로 높은 임피던스를 가지지만 정상 운전 시에 높은 임피던스로 인해 손실이 발생하므로 전력케이블로 활용하기에 불리하다.

통전층과 차폐층 주위에 투자율이 높은 매질인 철심을 배치한 경우 인덕턴스와 임피던스가 증가하였다. 또한 철심을 크기가 클수록 철심이 코일을 감싸는 형상일수록 인덕턴스와 임피던스가 증가함을 알 수 있다.

통전층의 인덕턴스가 증가할수록 회로모델 식 (8)에 의한 계산 결과와 FEM 해석 결과간의 차이가 발생하는데 이는 식 (8)에서  $L_1=L_2=M$ 이라는 가정에서의 오차와 철심의 비선형 B-H 특성 때문으로 판단된다.

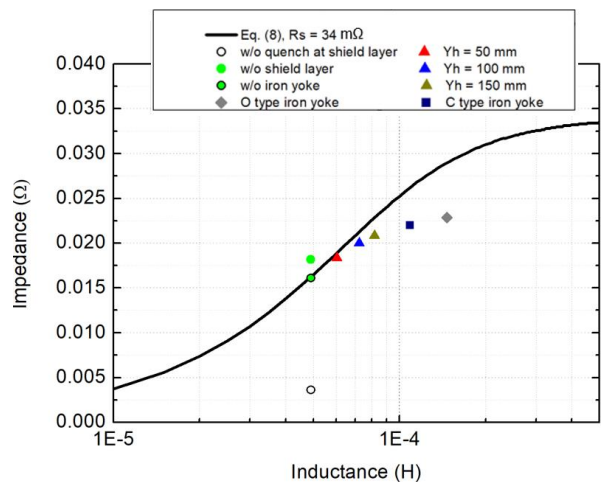


Fig. 7. Comparison of circuit model and FEM analysis result.

## 5. 결 론

유도형 한류 고온 초전도 케이블의 등가회로를 통해 차폐층의 저항과 통전층 자체의 인덕턴스에 의해 사고시 통전층의 임피던스가 결정됨을 확인하였다. 각각 통전층과 차폐층에 해당하는 두 개의 코일과 요크로 구성된 모델 케이블에 대해서 전자장 수치해석과 회로모델이 결합된 FEM 해석을 통하여 한류 고온 초전도 케이블의 정상운전시와 고장발생 시의 동작을 확인하였다.

정상운전시 통전층의 자기장이 대부분 차폐층에 의해 차폐되며 낮은 임피던스를 유지하였고 고장발생 시 차폐층 웬치에 의해 차폐층 전류가 감소하고 증가된 임피던스에 의해 고장전류가 효과적으로 제한됨을 확인하였다. 철심의 형상과 구조가 발생 임피던스 및 전류제한 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 한류 성능을 극대화하기 위해서는 차폐층 초전도체의 저항을 최소화하고 케이블 주변의 요크 배치를 최적화하여 인덕턴스를 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 차폐층 및 통전층의 웬치 발생에 따른 온도 변화 특성은 포함하지 않고 있다. 보다 정밀한 설계를 위해서는 초전도 선재의 E-J 특성 및 온도에 따른 저항변화를 고려한 열해석을 연계함으로써, 사고시 온도 상승에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

본 논문의 결과는 배전급 통전 용량을 갖는 유도성 한류 고온 초전도 케이블의 시제품 설계 방법으로 활용될 예정이다. 시제품은 제작의 용이성을 고려하여 1열 11턴의 초전도 케이블 70 m와 I형 철심으로 구성되며 차폐층 저항 증대를 위하여 차폐층에 별도의 저항체를 추가로 설치함으로써, 요구되는 고장전류 제한 성능을 만족하는 설계를 진행할 계획이다.

## ACKNOWLEDGMENT

This supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20171220100400).

## REFERENCES

- [1] D. M. Kim, "Investigation on pressure and temperature control of the cryogenic cooling system for HTS power cable," *Master's Dissertation*, Changwon National University, 2013.
- [2] M. J. Kim, K. W. Park, K. Y. Ahn, and Y. K. Kim, "Application of Fault Current Limiter in 22.9kV KEPCO power distribution line," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 1034-1035, 2015.
- [3] M. J. Kim, G. H. Lee, S. H. Bang, H. Y. Park, W. J. Choe, J. W. Sim, S. W. Lee, Y. G. Kim, and H. R. Kim, "The Application of Fault Current Limiter at Icheon substation in Korea," *1<sup>st</sup> International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology*, pp. 362-365, 2011.
- [4] H. R. Kim, S. E. Yang, S. D. Yu, W. S. Kim, K. J. Park, O. B. Hyun, B. M. Yang, J. W. Sim, and Y. G. Kim, "Installation and Testing of SFCLs," *IEEE transaction on applied superconductivity*, vol. 22, no. 3, pp. 1051-1054, 2012.
- [5] Y. Xin, H. Hong, J. Z. Wang, W. Z. Gong, J. Y. Zhang, A. L. Ren, M. R. Zi, Z. Q. Xiong, D. J. Si, and F. Ye, "Performance of Testing of the 35 kV/90MVA SFCL in Live-Grid Fault Current Limiting Tests," *IEEE transaction on applied superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1294-1297, 2011.
- [6] S. R. Lee, J. Y. Yoon, and B. M. Yang, "Operating Current for the application of 22.9kV hybrid SFCL to real power grid in Korea," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 12, no. 3, pp. 39-43, 2010.
- [7] L. F. Li, L. H. Gong, X. D. Xu, J. Z. Lu, Z. Fang, and H. X. Zhang, "Field Test and Demonstrated Operation of 10.5kV/1.5kA HTS Fault Current Limiter," *IEEE transaction on applied superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 2055-2058, 2007.
- [8] H. J. Jung, "A Study on the Design of Fault Current Limiting HTS Power Cable," *Master's Dissertation*, Changwon National University, 2013.
- [9] K. D. Sim, "Study on the design and transport characteristics of 22.9 KV, 50 MVA HTS power cable," *Doctor's Dissertation*, Yonsei University, 2010.
- [10] C. J. Lee, S. L. Lee, H. K. Kang, D. K. Bea, M. C. Ahn, O. B. Hyun, and T. K. Ko, "Study on the Characteristics of 30 kVA Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 4, pp. 110-113, 2002.
- [11] J. H. Kim, M. Park, M. H. Ali, A. R. Kim, S. R. Lee, J. Cho, K. D. Sim, S. H. Kim, and I. K. Yu, "A SFCL modeling and application with real HTS material connecting to real time simulator," *Physica C: Superconductivity*, vol. 468, pp. 2067-2071, 2008.