

# 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 사고전류제한 특성 시뮬레이션 및 실험 분석

(Analysis on Simulation and Experiment for Fault Current Limiting Characteristics of SFCL  
using Magnetic Coupling of Two Coils with Series Connection)

임성훈 · 김진석 · 안재민 · 문종필 · 김재철\*

(Sung-Hun Lim · Jin-Seok Kim · Jae-Min An · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim)

## 요 약

본 논문에서는 본 저자가 제안한 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 갖는 초전도 전류제한기의 사고전류제한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 정상시에는 두 코일로부터 발생하는 자계는 상쇄되지만 사고가 발생되면 초전도 소자의 저항발생으로 더 이상 두 코일로부터 자계는 상쇄되지 않게 되고 제한기 임피던스 발생으로 고장전류가 제한된다. 제안한 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 두 코일의 인덕턴스비를 조절함으로써 제한기의 동작전류와 임피던스는가 향상될 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었다.

## Abstract

The simulation and experiment for the fault current limiting characteristics of the superconducting fault current limiter (SFCL) using the magnetic coupling of series connected two coils were performed. The magnetic fluxes generated from two coils were canceled out during a normal time. However, the resistance generation of high- $T_C$  superconducting (HTSC) element after a fault occurrence allows the magnetic fluxes of two coils and contributes to the fault current limiting operation. Through the computer simulation and the current limiting experiment for this SFCL, the operational current and the limiting impedance of the SFCL could be confirmed to be improved by adjusting the inductance ratio of two coils.

Key Words : Fault Current Limiting Characteristics, Superconducting Fault Current Limiter(SFCL),  
Magnetic Coupling, Inductance Ratio

## 1. 서 론

병렬연결된 두 코일이 자기적으로 결합된 구조를 갖는 자속구속형 초전도 사고전류제한기는 사고전에는 초전도소자의 영 저항으로 인해 두 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 단락회로로 동작하

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수  
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-7961  
E-mail : jckim@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2008년 2월 15일  
1차심사 : 2008년 2월 21일, 2차심사 : 2008년 3월 20일  
심사완료 : 2008년 5월 20일

게 된다. 하지만, 사고가 발생되어 초전도 소자의 저항이 발생하게 되면 두 코일에서 발생하는 자속은 더 이상 상쇄되지 않게 되고 이때, 발생한 제한기 임피던스에 의해 사고전류가 제한되는 특징을 가지고 있다[1-2].

두 코일의 또 다른 자기결합방법으로 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기를 본 저자는 제안한 바 있으며, 병렬연결된 경우와 동일한 동작원리에 의해 사고전류제한이 이루어지며 제한기 사고전류제한 특성이 두 코일의 결선방향과 두 코일의 인덕턴스 비에 의존하는 특징을 가지고 있음을 보고한 바 있다[3-4].

본 논문에서는 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 사고전류제한 실험으로부터 얻은 초전도 소자의 저항발생 결과를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 두 코일의 인덕턴스비를 조절함으로써 제한기 동작전류와 제한기 임피던스를 설정할 수 있었으며 사고전류제한 실험과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조 및 동작원리

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 하나의 철심에 두 코일이 직렬 연결되며 초전도 소자는 두 코일 중 하나와 병렬로 연결된 구조를 갖는다.

동작원리는 크게 사고전과 사고후로 나누어 기술할 수 있다. 사고전, 즉 평상시에는 초전도 소자는 초전도상태에 있기 때문에 각 코일에서 유기되는 자속은 상쇄되어 각 코일에 유기되는 전압은 제로로 유지하게 된다. 사고가 발생되어 초전도소자에 흐르는 전류가 임계값을 넘어 상전도로 전이되어 저항이 발생하게 되면 초전도 소자에 전압이 유기되며 이로 인해 각 코일에 전압이 유도되어 제한기 임피던스가 발생됨으로서 사고전류가 제한된다.

그림 2는 사고발생시 제한기 등가회로를 보여주며, 등가회로로부터 제한기 동작전류( $I_{op}$ )와 제한기

임피던스( $Z_{FCL}$ )를 식 (1)과 (2)와 같이 유도할 수 있다. 식 (1)에서  $I_c$ 는 초전도소자의 임계전류값을 나타내며 초전도 소자에 흐르는 전류( $i_{sc}$ )가 임계전류값을 넘을 경우 초전도소자가 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이하면서 저항이 발생하게 된다. 식 (1)과 (2)에서 보는 바와 같이 두 코일의 인덕턴스 비( $L_1/L_2$ )를 조절함으로써 제한기 동작전류와 임피던스를 설정할 수 있음을 확인할 수 있다.

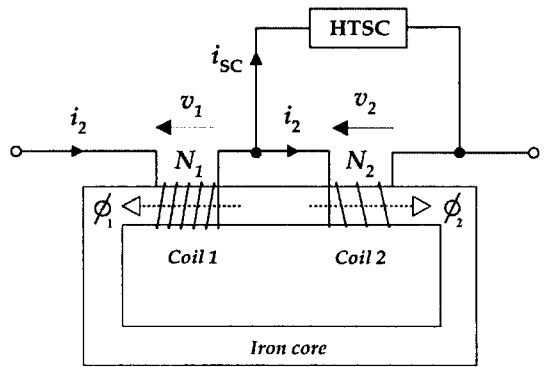


그림 1. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 구조  
Fig. 1. Structure of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection

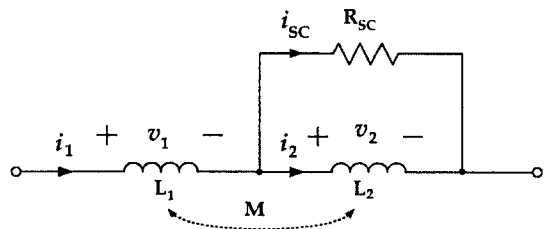


그림 2. 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of a SFCL using magnetic coupling of two coils with series connection

$$I_{op} = \frac{j\omega L_2}{j\omega L_2 + j\omega M} I_c \quad (1)$$

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega R_{sc}(L_1 + L_2) + 2j\omega M R_{sc}}{R_{sc} + j\omega L_2} \quad (2)$$

## 2.2 시뮬레이션을 통한 사고전류제한 특성 분석

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 동작특성을 시뮬레이션하기 위해 선로저항( $R_L=1[\Omega]$ ) 및 선로 인덕턴스( $L_L=1.6[mH]$ )와 부하저항( $R_{Load}=51.5[\Omega]$ )을 포함한 파라미터로 구성된 등가회로부터 미분방정식을 유도하였으며 FDM(finite difference method)을 이용하기 위해 식 (3)과 같이 행렬변수로 표현하여 전개하였다.

$$V = R \cdot I + L \cdot \Delta I / \Delta t \quad (3)$$

여기서 R, L은 초전도 소자의 상전도 저항과 선로 저항, 부하저항을 비롯, 선로 인덕턴스를 포함한 행렬변수를 나타낸다. 시뮬레이션시 초전도 소자의 저항은 그림 3과 같이 실험으로부터 얻은 근사곡선을 반영하였으며, 매시간 변화된 전류값을 식 (4)와 같이 구하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\Delta I = L^{-1} \cdot V \Delta t - L^{-1} \cdot R \cdot I \Delta t \quad (4)$$

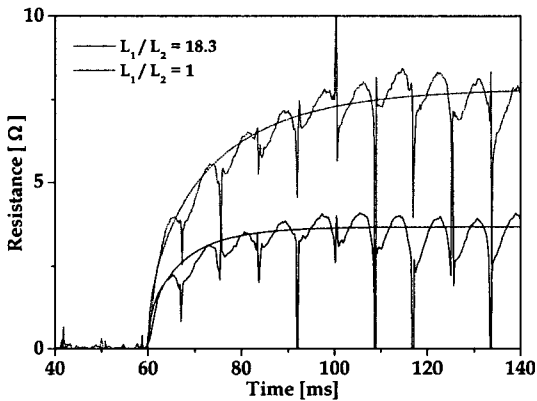


그림 3. 초전도 소자의 저항파형  
Fig. 3. Resistance curves of HTSC element

## 2.3 결과 및 고찰

그림 4와 5는 두 코일의 인덕턴스 비가 18.3인 경우 사고발생시 초전도 소자를 포함한 두 코일의 시

뮬레이션과 사고전류제한 실험을 통해 얻은 전류, 전압파형을 보여준다. 사고발생시 사고전류가 제한되는 제한기 동작전류가 초전도 소자의 임계전류값(21[A])보다 작은 값에서 이루어지는 것을 볼 수 있으며 등가회로에서 보는 것처럼 코일 1에 흐르는 전류가 코일 2와 초전도 소자에 흐르는 전류의 합과 같게 되는 것을 확인할 수 있다.

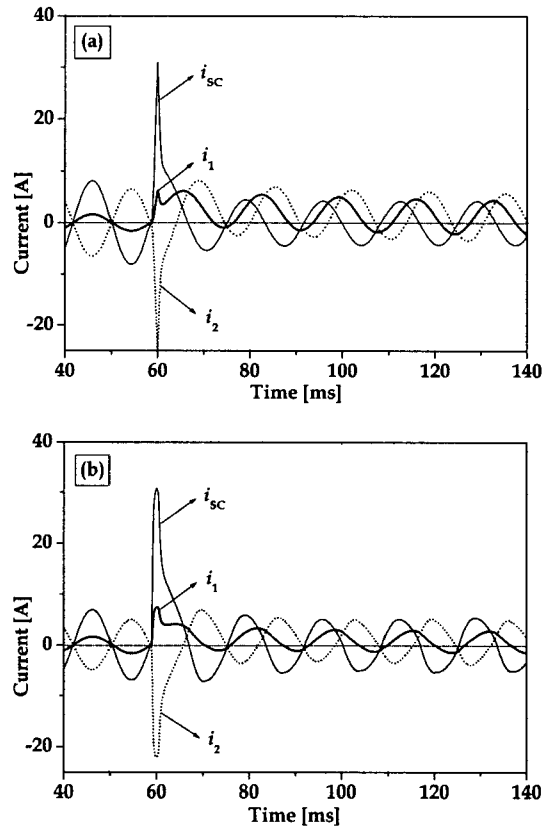


그림 4. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전류파형 ( $L_1/L_2=18.3$ )  
(a) 시뮬레이션 파형, (b) 실험 파형  
Fig. 4. Current waveforms of HTSC element and two coils ( $L_1/L_2=18.3$ )  
(a) Simulation waveform  
(b) Experimental waveform

사고시 초전도 소자에 유기전압은 코일 2와 병렬로 연결된 구조로 인해 코일 2와 동일한 전압이 유기되는 것을 볼 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 실험결과가 일치하는 것을 비교할 수 있다.

그림 6과 7은 두 코일의 인덕턴스 비가 1인 경우 시뮬레이션과 사고전류제한 실험을 통해 얻은 제한기 전류, 전압파형을 보여준다. 두 코일의 인덕턴스 비가 18.3인 경우에 비해 제한기 동작전류가 증가되는 것을 그림 6에서 확인할 수 있으며 이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 코일 2의 인덕턴스가 증가함에 따라 초전도소자의 임계전류에 대한 제한기 동작전류의 비가 증가하게 되는 결과와 일치함을 볼 수 있다. 또한, 사고발생후 제한되는 사고전류크기는 두 코일의 인덕턴스 비가 18.3인 경우에 비해 증가되는 것을 볼 수 있으며 앞의 등가회로로부터 분석한 식 (2)에서도 일치된 결과를 확인할 수 있다. 초전도 소자를

포함한 각 코일에 유기되는 전압은 두 코일이 동일한 턴수를 가지고 있기 때문에 동일한 크기로 유기되는 것을 확인할 수 있다.

직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 통해 기존의 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기와 동일한 사고전류제한이 이루어짐을 확인하였다.

분석을 통해, 두 코일의 인덕턴스 비를 조절함으로써 제한기 동작전류와 제한기 임피던스를 조절하여 사고시 사고전류제한 레벨을 제어할 수 있음을 확인하였다.

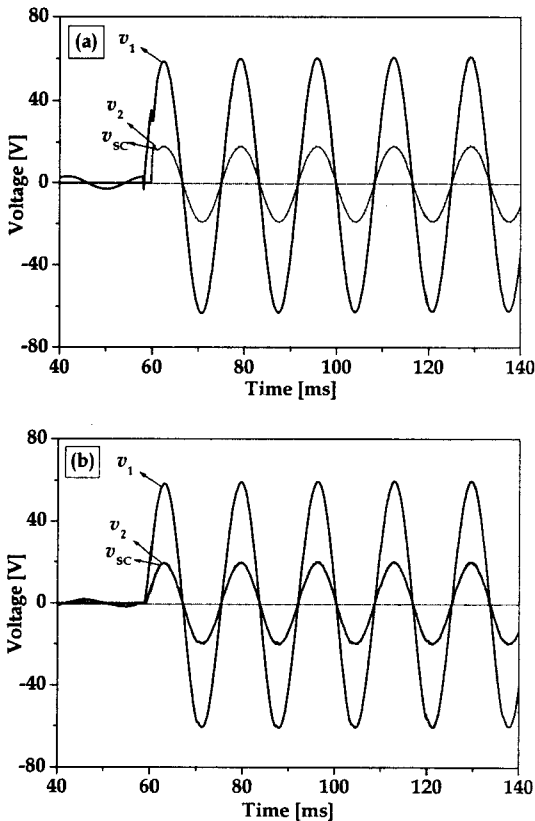


그림 5. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전압파형 ( $L_1/L_2=18.3$ )  
 (a) 시뮬레이션 파형, (b) 실험 파형  
 Fig. 5. Voltage waveforms of HTSC element and two coils ( $L_1/L_2=18.3$ )  
 (a) Simulation waveform  
 (b) Experimental waveform

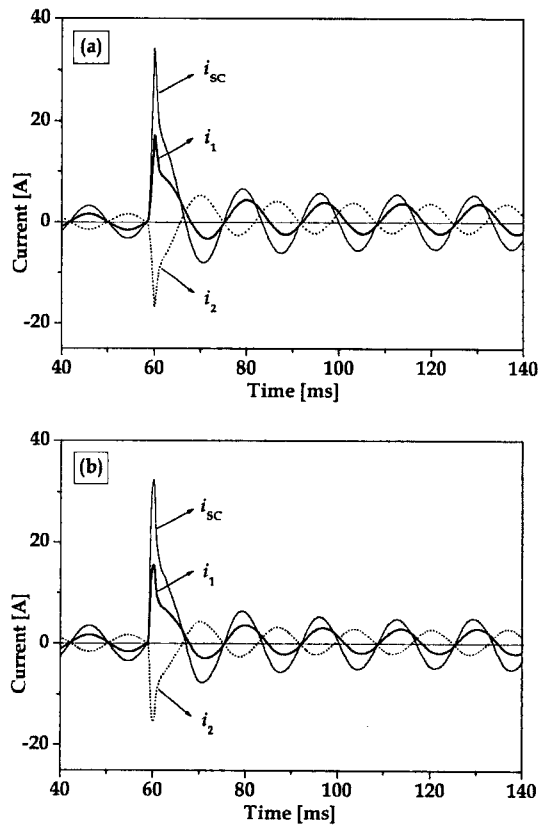


그림 6. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전류파형 ( $L_1/L_2=1$ )  
 (a) 시뮬레이션 파형, (b) 실험 파형  
 Fig. 6. Current waveforms of HTSC element and two coils ( $L_1/L_2=1$ )  
 (a) Simulation waveform  
 (b) Experimental waveform

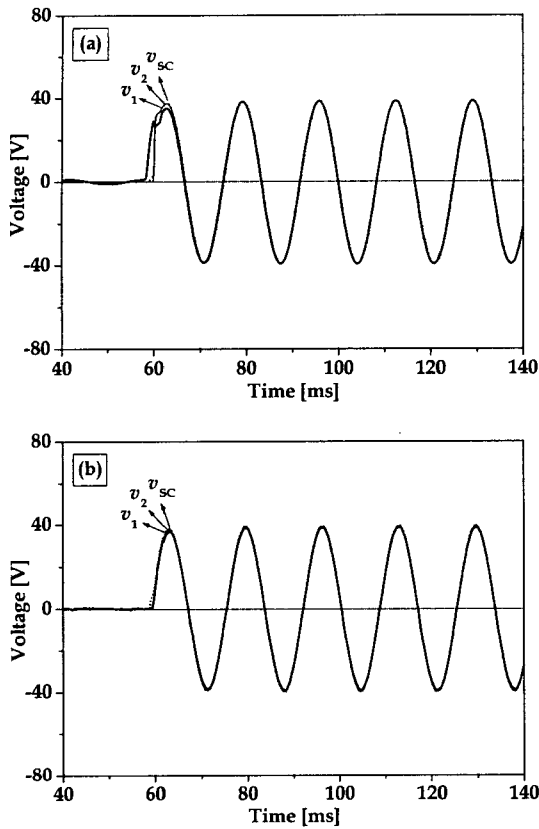


그림 7. 두 코일을 포함한 초전도 소자의 전압파형 ( $L_1/L_2=1$ )  
 (a) 시뮬레이션 파형, (b) 실험파형  
 Fig. 7. Voltage waveforms of HTSC element and two coils ( $L_1/L_2=1$ )  
 (a) Simulation waveform  
 (b) Experimental waveform

### 3. 결 론

본 논문에서는 저자가 제안한 직렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 시뮬레이션과 사고전류제한 실험을 통해 분석하였으며 등가회로부터 분석한 결과와 일치된 결과를 확인할 수 있었다. 분석을 통해 두 코일의 인덕턴스 비를 조절함으로써 제한기의 동작전류와 임피던스 변화를 수행할 수 있어 제한기의 효율성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

### References

- [1] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high- $T_c$  superconducting fault current limiter using a series resonance", *Cryogenics*, vol. 44, pp. 249-254, April 2004.
- [2] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteristics due to Winding Direction between Coil 1 and Coil 2 in a flux-lock type SFCL", *Phys. C*, vol. 416, pp. 34-42, November 2004.
- [3] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Seokcheol Ko, Hyeong-Gon Kang, and Byoung-Sung Han, "Fault Current Limiting Characteristics of New Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter using Flux Linkage", *phys. Stat. sol. (c)*, vol. 2, no. 5, pp. 1755-1760, March 2005.
- [4] S. H. Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL with Series Connection of Two Coils", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, June 2007.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.  
 E-mail : superish73@ssu.ac.kr

#### 김진석 (金辰錫)

1983년 1월 26일생. 2007년 서울산업대학교 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학부 석사과정.  
 E-mail : redwolf832@nate.com

#### 안재민 (安宰民)

1982년 1월 30일생. 2007년 안양대학교 전기전자공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학부 석사과정.  
 E-mail : oloajm@nate.com

#### 문종필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.  
 E-mail : pichard@ssu.ac.kr

#### 김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.  
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr