

## 전압증가에 따른 자속구속형 초전도 한류기의 전류제한 및 회복특성 분석

(Analysis on Fault Current Limiting and Recovery Characteristics of Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter According to Increase of Applied Voltage)

오금곤 · 한태희 · 조용선 · 최효상\* · 최명호 · 한영희 · 성태현

(Kum-Gon Oh · Tae-Hee Han · Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Cho · Myoung-Ho Choi ·  
Young-Hee Han · Tae-Hyun Sung )

### 요 약

자속구속형 초전도 한류기는 1차 권선과 초전도 소자가 직렬로 연결된 2차 권선을 갖는 변압기로 구성되어 있다. 이 초전도 한류기는 결선방향에 따라 감·가극 결선으로 나누어진다. 1차 권선과 2차 권선의 인덕턴스 비에 따라 자속구속형 초전도 한류기는 사고전류의 제한특성을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 인가전압에 따른 자속구속형 초전도 한류기의 전압·전류 특성을 분석하였다. 감·가극 결선된 자속구속형 초전도 한류기의 인가전압을 증가시켰을 때, 초기에 제한되는 전류 및 초전도 소자의 켄치 시간은 증가하였다. 초전도 소자의 회복시간은 인가전압이 증가함에 따라 증가하였다. 그러므로 자속구속형 초전도 한류기의 회복특성은 초전도 소자의 소비전력이 증가하기 때문에 초전도 소자에서 소비되는 에너지에 크게 의존한다는 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

The flux-lock type SFCL consists of transformer with primary and secondary windings connected to a superconducting element in serial. It can be divided into the subtractive and the additive polarity windings according to the winding direction. It could change the fault current limiting characteristics according to the inductance ratio between the coil 1 and coil 2. We investigated the voltage-current characteristics of the flux-lock type SFCL according to the increment of applied voltage. When the applied voltage of the SFCL with the subtractive and the additive polarity windings was increased, a initial limiting current ( $I_{lim}$ ) and the quench time of the superconducting element were increased. The recovery time of the superconducting element was increased by increment of applied voltage. Therefore, it was confirmed that recovery characteristics in the flux-lock type SFCL were largely dependent on the consumed energy of a superconducting element because of increment of the consumption power into the superconducting element.

Key Words : Flux-Lock Type Sfd, Fault Current Limiting, Recovery, Consumed Energy

\* 주저자 : 조선대학교 전기공학과 교수

Tel : 062-230-7025, Fax : 062-230-7020, E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2007년 6월 11일, 1차심사 : 2007년 6월 14일, 심사완료 : 2007년 6월 26일

## 1. 서 론

해마다 급증하는 전력수요로 인해 전력계통의 복잡화와 계통임피던스의 감소는 단락사고 시 고장전류의 증가를 초래하고, 관련 전력기기의 열적·기계적 충격 등 안정도 문제에 심각한 영향을 주게 되었다. 이의 대책으로 대용량 차단기의 교체와 모선분리 등의 방법을 실시하고 있지만 평상시 계통에 미치는 영향과 손실발생에 따른 효율저하, 대용량 차단기로의 교체에 따른 경제적인 문제가 수반되고 있다. 이러한 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 방안으로는 고온 초전도 사고전류제한기가 있다. 고온 초전도 사고전류제한기는 정상상태에서 전기저항이 0이며 계통내 사고 발생시 고저항 상태로 상전이가 발생하기 때문에 부가적인 제어장치 없이 사고전류를 고속으로 제한할 수 있는 장점이 있어 국·내외적으로 활발하게 연구하고 있다[1-6]. 자속구속형 사고전류제한기는 저항형 전류제한기에 변압기를 연결한 형태이며 사고전류가 코일과 소자에 양분되기 때문에 소자 파손의 우려가 적고 두 코일의 권선 수 비율에 따른 인덕턴스의 변화로 전류제한 범위를 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 초전도 사고전류제한기를 실계통 전력 시스템에 적용하기 위해서는 전력계통 시스템에서의 신속한 사고전류 제한과 계통의 사고가 해결되었을 때 정상 상태로의 빠른 회복이 필수적이라 할 수 있다.

본 논문은 자속구속형 전류제한기를 감극과 가극으로 결선하고 인가전압을 증가하였을 때의 켄치 특성을 비교·분석하였고, 사고전류 제거 후에 초전도 상태로 회복되는 특성을 해석하였다. 또한 결선방향에 따라 인가전압을 증가하였을 때 인덕턴스와 초전도 소자가 보유하고 있는 소비에너지와의 관계를 비교·분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 동작원리 및 실험 방법

초전도 소자는  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  박막을 meander-line 형태로 제작하였고, 직경 2[inch], 두께 0.3[ $\mu$ m], 전체

길이 420[mm]의 제원을 가지고 있다. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 구성 요소인 변압기는 하나의 철심과 1·2차 권선으로 구성된다. 표 1과 그림 1은 변압기의 철심과 코일의 설계사양과 실제 사진을 나타낸 것이다.

자속구속형 초전도 전류제한기의 회로도는 그림 2와 같다.  $V_0$ 는 전원전압,  $R_m$ 은 회로에 흐르는 전류를 측정하기 위한 표준저항,  $R_L$ 은 부하저항을 나타낸다.

표 1. SFCL을 위한 변압기의 설계 파라미터  
Table 1. The designed parameters of the transformer for SFCL

Iron Core	Size	Unit
외측 수평길이	235	[mm]
외측 수직길이	250	[mm]
내측 수평길이	137	[mm]
내측 수직길이	155	[mm]
두께	66	[mm]
Coil 1, 2	Value	Unit
코일 1의 자기인덕턴스 (턴수)	48.4 (63)	[mH] (Turns)
코일 2의 자기인덕턴스 (턴수)	18.1 (42)	[mH] (Turns)

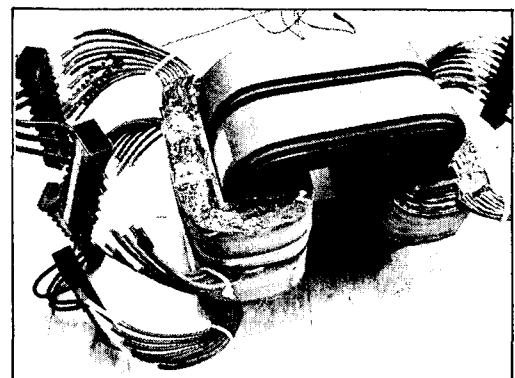


그림 1. 실험에 사용된 철심과 권선  
Fig. 1. Core and windings used in test

$SW_1$ 과  $SW_2$ 는 사이리스터(SCR)를 이용한 스위치이다.  $SW_1$ 은 전원전압을 인가하기 위한 전원 스위치이며,  $SW_2$ 는 단락사고를 발생시키기 위한 스위치이다. 사고를 모의하기 위해서  $SW_1$ 을 닫은 후  $SW_2$ 를

이용하여 단락사고를 모의함으로써 과도전류를 발생시켜 SFCL이 동작하도록 하였다. 초전도 소자인 YBCO박막은 임계전류를 초과하였을 때 퀘치가 발생하며 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이를 일으킨다. 초전도 전류제한기는 사고전류가 초전도소자의 임계전류를 초과할 때 초전도 소자에 저항이 발생하여 사고전류를 제한한다. 자속구속형 전류제한기의 동작 원리는 정상상태에서는 초전도 소자의 양단 전압이 0이며, 1차 코일과 2차 코일에서 발생하는 전압이 없다. 즉 이라면  $dB/dt=0$ 은 항상 성립된다. 그러나 사고가 발생하여 임계전류를 초과하는 전류가 초전도 소자로 통전되면서 초전도 소자는 퀘치되어 소자저항이 급격히 상승하게 되고, 이로 인해 1·2차 코일의 쇄교 자속은 시간적인 변화가 생겨 코일 양단에 전압이 유기되어 전체 임피던스만큼 사고전류는 제한된다. 식 (1)~(4)는 1·2차 권선의 결선방향에 따라 감극과 가극 결선된 자속구속형 사고전류제한기의 전압·전류 관계식을 나타낸 것이다.

(1) 감극 결선된 자속구속형 사고전류제한기의 전압·전류 관계식

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (1)$$

$$V_1 = V_{SC} - V_2 \quad (2)$$

(2) 가극 결선된 자속구속형 사고전류제한기의 전압·전류 관계식

$$I_{FCL} = -I_1 + I_{SC} \quad (3)$$

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (4)$$

회복특성은 초전도 소자가 사고전류로 인해 상전도 상태로 전이된 후, 사고전류가 소멸되고 난 뒤 다시 초전도 상태로 복구되는 성질을 나타낸다. 회복특성 실험은 사고발생 후 전원이 차단된 상태와 같은 조건에서 측정하였다.

## 2.2 실험 결과 및 고찰

그림 3은 감극 결선된 자속구속형 전류제한기를 전

압 120[V]에서 200[V]로 변화시켰을 때 전압·전류 특성을 나타내었다. 선로전류 ( $I_{FCL}$ )가 초전도 소자의 임계전류( $I_c=23.4[A]$ )를 넘는 순간 소자의 저항 발생으로 인하여 전압이 발생하기 시작한다. 초기 제한전류 ( $I_{lim}$ )와 인가전압과의 관계를 알아보기 위하여 전압을 120[V]에서 200[V]로 증가하였을 때 초기 제한전류는 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 사고 시작시점부터 소자전압이 발생할 때까지의 시간인 응답시간( $T_q$ )은 전압이 증가할수록 짧아지고 있음을 알 수 있다. 이는 식 (2)에서와 같이 감극 결선시 인가전압의 상승으로 인한 사고전류의 증가율이 커져 초전도 소자가 임계전류에 도달하는 시간이 빨라졌기 때문이다.

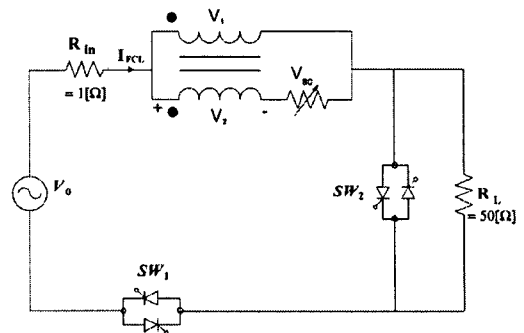


그림 2. 자속구속형 전류제한기의 실험회로도  
Fig. 2. Test circuit of a flux-lock type SFCL

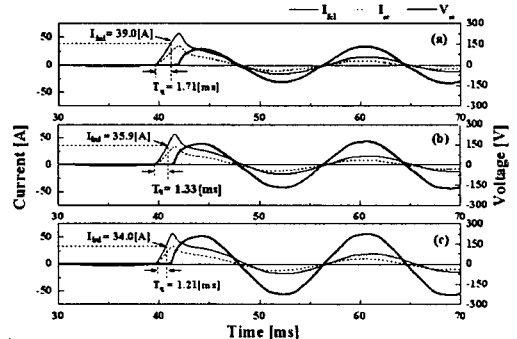


그림 3. 전압증가에 따른 감극형 자속구속형 SFCL의 전압·전류 곡선( $N_1:N_2=63:42$ )  
(a) 120[V] (b) 160[V] (c) 200[V]  
Fig. 3. V-I curves of the flux-lock type SFCL with the subtractive polarity winding according to the increase of applied voltage( $N_1:N_2=63:42$ )  
(a) 120[V] (b) 160[V] (c) 200[V]

전압증가에 따른 자속구속형 초전도 인류기의 전류제한 및 외복특성 분석

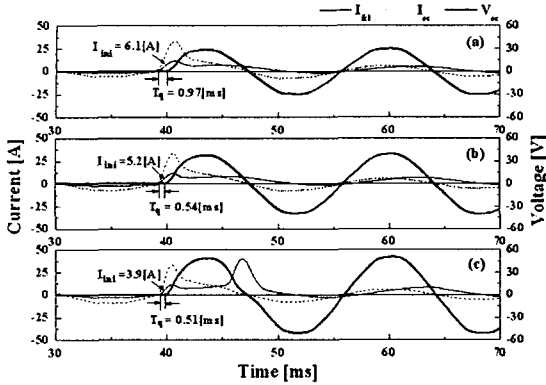


그림 4. 전압증가에 따른 가극형 자속구속형 SFCL의 전압·전류 곡선( $N_1:N_2=63:42$ )  
 (a) 120(V) (b) 160(V) (c) 200(V)  
 Fig. 4. V-I curves of the flux-lock type SFCL with the additive polarity winding according to the increase of applied voltage( $N_1:N_2=63:42$ )  
 (a) 120(V) (b) 160(V) (c) 200(V)

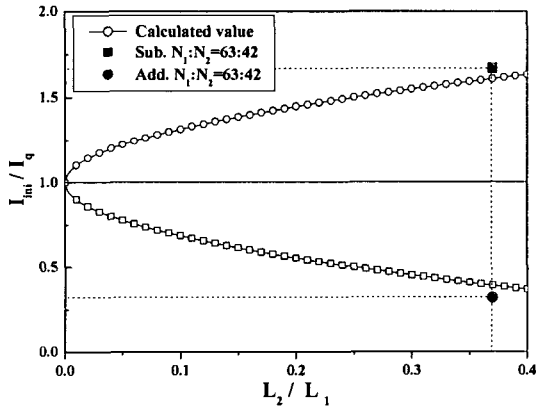


그림 5. 자속구속형 감극 결선과 가극결선의  $L_2/L_1$ 에 대한  $I_{lim}/I_q$ 의 특성  
 Fig. 5. Characteristics between  $L_2/L_1$  and  $I_{lim}/I_q$  on the flux-lock type SFCL with the subtractive and additive polarity windings

그림 4는 가극 결선된 자속구속형 전류제한기에서 전압 증가시 전압·전류 특성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 제한전류는 인가전압이 증가할수록 감소하고 있으며, 응답속도는 빨라지고 있음을 알 수 있다. 감극 결선에서와 같이 인가전압에 따른 특성이 같은 경향을 보이고 있지만 초기 제한전류와 응답시간이 현저하게 차이가 나고 있음을

알 수 있다. 이는 가극결선에서의 소자전류는 식 (3)과 같이 코일 1의 전류( $I_1$ )와 선로전류( $I_{FCL}$ )의 차로 나타나기 때문이다. 초기 제한전류가 작다는 것은 사고전류가 발생하였을 때 보다 빠른 시간에 낮은 전류에서 제어할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

인덕턴스 비( $L_2/L_1$ )와 초전도 소자의 임계전류 비( $I_{lim}/I_q$ )의 관계를 그림 5에 나타내었다. 감극결선의 경우 1차 코일에 비해 2차 코일의 인덕턴스 비가 감소할수록 초기제한 전류는 증가한다는 것을 알 수 있다. 가극 결선에서는 감극 결선과 반대로 동작하고 있다. 즉 2차 코일의 인덕턴스 비가 감소할수록 초기 제한전류는 감소하기 때문에 전류제한특성이 감극 결선보다 유리하다는 것을 알 수 있다.

이것은 1차 코일과 2차 코일의 결선방향에 따라 사고시 철심에서 발생하는 쇄교 자속의 증감으로 인해 발생하며, 인덕턴스 비의 변화는 자속구속형 전류제한기의 동작특성을 결정하는 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있다.

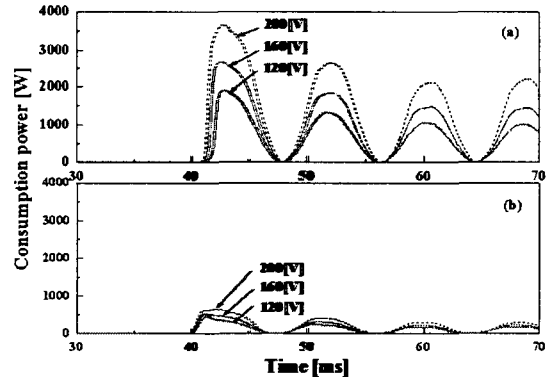


그림 6. 전압증가에 따른 자속구속형 SFCL의 소비전력 파형( $N_1:N_2=63:42$ )  
 (a) 감극결선 (b) 가극결선  
 Fig. 6. Consumption power curves of a flux-lock type SFCL according to the increase of applied voltage( $N_1:N_2=63:42$ )  
 (a) subtractive polarity winding (b) additive polarity winding

그림 6은 결선 방향에 따른 전압 증가시 초전도 소자에서 소비되는 전력을 나타내고 있다. 그림 6-(a)는 감극결선에서 소비전력이며 사고전압이 높을수록 소비전력도 증가하게 되며, 이로 인해 초전도 소

자의 부담이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 6-(b)는 가극 결선으로 사고전압이 증가할수록 소비 전력은 증가하나, 그 증가비율은 감극에 비해 낮게 나타나고 있다. 이는 고전압에서 사고가 발생할 경우 가극 결선된 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자가 더 적은 부담을 받기 때문에 소자파손을 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

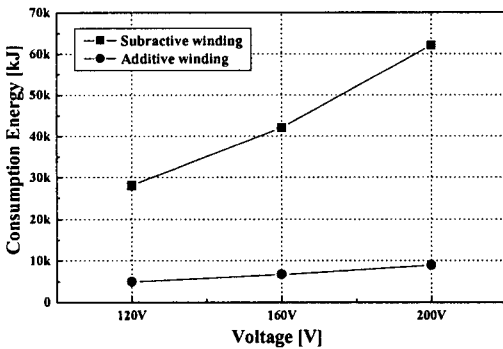


그림 7. 전압증가에 따른 자속구속형 SFCL의 소비에너지 특성( $N_1:N_2=63:42$ )

Fig. 7. Consumption energy characteristics of a flux-lock type SFCL according to the increase of applied voltage ( $N_1:N_2=63:42$ )

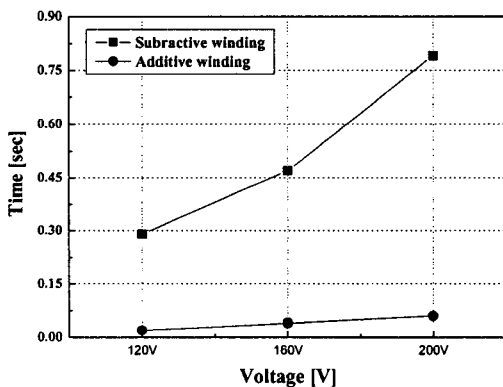


그림 8. 전압증가에 따른 자속구속형 SFCL의 회복 특성 ( $N_1:N_2=63:42$ )

Fig. 8. Recovery characteristics of a flux-lock type SFCL according to the increase of applied voltage ( $N_1:N_2=63:42$ )

그림 7은 감극결선과 가극결선에서의 전압과 소비 에너지와의 관계를 나타내고 있다. 전압이 증가할수록 감극결선에서의 소비에너지 증가율이 더 높게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이는 초전도 소자에서의 소비에너지를  $w = V_{sc} \cdot I_{sc} \cdot t$ 으로 표현할 수 있으며, 감극 결선인 경우 소자에 걸리는 전압은 식 (2)와 같이 소비에너지는 높게 나타났다. 반면 가극결선의 경우 식 (4)와 같이 소비에너지는 감극결선보다 작게 나타난다.

그림 8은 전압증가에 따른 회복시간과의 관계를 나타내었다. 감극결선의 경우 상전도 상태에서 초전도 상태로의 회복하는 시간이 가극결선보다 더 오래 걸린다는 것을 확인하였다. 초전도 소자의 상전이는 발생된 열에너지의 크기와 큰 상관관계를 갖고 있다. 이는 초전도 소자의 열에너지는 근본적으로 소비에너지에 비례하기 때문에 초전도 소자의 소비에너지와 회복특성의 그래프가 거의 일치한다는 것으로 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 전압증가에 따른 켄치 특성과 회복 특성을 감극 결선과 가극 결선에 따라 비교·분석하였다. 전압이 증가할수록 감극 결선과 가극 결선에서 초기 제한전류( $I_{lim}$ )와 켄치 시간( $T_Q$ )이 감소하여 사고전류를 신속하게 제한할 수 있었다. 가극 결선의 경우 감극 결선보다 사고전류제한 특성이 더 우수하고 신속한 동작특성을 보여 초전도 소자의 파손을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 회복 특성은 초전도 소자에서 발생하는 열에너지의 영향을 받으므로 소자가 갖는 소비에너지와 깊은 상관관계가 있다. 이는 전압증가에 따라 나타나는 소비에너지의 그래프와 회복 특성을 나타내는 그래프가 거의 일치한다는 것으로 확인할 수 있었다. 자속구속형 전류제한기의 전압증가에 따라 감극결선보다 가극결선에서 초기제한전류, 켄치특성, 회복시간 등에 우수한 특성을 보이고 있는 것을 확인하였다.

이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

### References

- [1] T. Hoshino, I. Muta, H. Tsukiji, K. Ohkubo, M. Etoh, "Recovery Time of Superconducting Non-Inductive Reactor Type Fault Current Limiter", IEEE trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp.2403-2406, July 1996.
- [2] T. Matsumura, T. Uchii, Y. Yokomizu, "Proposal of Flux-Lock-Type Fault Current Limiter with High-Tc Superconducting Element", Translated from Denki Dakkai Ronbunshi, Vol. 117-B, No. 6, pp. 851-856, June 1997.
- [3] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, "Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films" Cryogenics, Vol. 41, pp 163-167, 2001.
- [4] S. H. Lim, H. S. Choi, B. S. Han, "Operational Characteristics of a Flux-Lock-Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter With a Tap Changer" IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 14, No. 1, p82, 2004.
- [5] S. H. Lim, H. S. Choi, B. S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter using series resonance", Cryogenics, Vol. 44, pp 249-254, 2004.
- [6] T. H. Han, H. S. Choi, S. H. Lim, N. Y. Lee, "Recovery characteristics of flux-lock type superconducting fault current limiter", Physica C, to be published.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 오금곤 (吳金坤)

1946년 1월 17일생. 1968년 조선대 전기공학과 졸업. 1994년 동신대학교 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기전자공학부 졸업(박사). 현재 조선대학교 공대 전기공학과 교수.  
 Tel : (062)230-7033  
 Fax : (062)230-7020  
 E-mail : ggoh@chosun.ac.kr

#### 한태희 (韓太熙)

1964년 7월 20일생. 1991년 전북대학교 금속공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 (박사).

#### 조용선 (趙鎔善)

1980년 1월 15일생. 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 박사과정.

#### 최효상 (崔孝祥)

1967년 2월 21일생. 1985년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 전북대학교 전기 공학과 졸업(박사). 1995~2003년 한국전력연구원 근무. 2003년~현재 조선대학교 전기공학과 조교수.  
 Tel : (062)230-7025  
 Fax : (062)230-7020  
 E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

#### 최명호 (崔明鎬)

1965년 6월 8일생. 1992년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 3월~현재 광주 보건대학교 의료공학과 조교수  
 Tel : (062)958-7772  
 Fax : (062)958-7526  
 E-mail : mhchoi@mail.ghc.ac.kr

#### 한영희 (韓榮熙)

1965년 8월 1일생. 1988년 서울대학교 공대 무기재료 학과 졸업, 1990년 동 대학원 무기재료학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.

#### 성태현 (成台鉉)

1959년 10월 9일생. 1982년 한양대학교 공대 무기재료 공학과 졸업. 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업 (석사). 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(박사). 1991~1992년 ISTEK 근무. 1992~1995년 MIT Post. Doc. 현재 한전전력연구원 수석연구원.