

## 초전도 응용기기 안정성 진단을 위한 AE센서용 압전소자의 성능개선 연구

### Study on Improvement of the Piezoelectric Properties of Acoustic Emission Sensor to be Used for Superconducting Application Systems

김경준<sup>1</sup>, 김주형<sup>1</sup>, 송정빈<sup>1</sup>, 백종후<sup>3</sup>, 장재영<sup>4</sup>, 고태국<sup>5</sup>, 이해근<sup>2,\*</sup>

K. J. Kim<sup>1</sup>, J. H. Kim<sup>1</sup>, J. B. Song<sup>1</sup>, J. H. Paik<sup>3</sup>, J. Y. Jang<sup>4</sup>, T. K. Ko<sup>5</sup>, H. G. Lee<sup>2,\*</sup>

**Abstract:** Acoustic emission (AE) signal from an HTS tape has a low signal to noise ratio, due to the large amount of noise caused by the boiling of the liquid cryogen or mechanical vibration from the cryo-cooler. In an attempt to improve the sensitivity of the AE sensor,  $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3 + 0.2 \text{ wt}\% Cr_2O_3 + 1.0 \text{ wt}\% Nb_2O_5$  ceramics sintered at  $1200^\circ C$  was synthesized. In addition, the resonance ( $f_r$ ) and anti-resonance frequencies ( $f_a$ ) were measured using the specimens with various thicknesses (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 mm). According to the test results, large AE signals with high frequencies were obtained from the AE sensor fabricated using a piezoelectric disc with a thinner thickness.

**Key Words:** superconductor, piezoelectric, acoustic emission (AE).

#### 1. 서 론

음향 방출(Acoustic Emission, AE) 센서는 극저온 환경에도 적용이 가능하고 전기적 신호를 통해 확인이 불가능한 초전도체의 손상 및 국부적인 열 발생 등의 이상신호를 검출할 수 있기 때문에, 1970년대부터 AE 센서를 이용한 초전도체 응용기기의 이상검출과 안정성 진단에 관한 연구가 진행되어 왔다[1-4]. AE 센서의 원리는 압전체를 사용하여 기계적인 진동을 전기적인 신호로 변환하는 것으로 전기적으로 절연된 시스템에 응용할 수 있다. AE 센서를 사용하여 초전도체의 내부에 발생하는 기계적인 결함이나 conductor motion, 절연재료인 에폭시의 균열 등을 감지하는데 대한 연구 또한 진행된 바 있다[5, 6].

그러나, 최근에 개발되어 응용되고 있는 2세대 박막형 초전도 단일 선재인 경우, 이상 발생 시 음향방출의 신호원(source)인 초전도 층이 불과 1 ~ 2 μm 정도로 매우 얇고, 극저온 환경유지를 위한 냉동기 작동 및

냉매의 끓음 등에 의한 잡음으로 신호 대 잡음비(SNR)가 낮아져 AE 센서의 이상신호에 대한 검출 감도 향상이 요구된다. 본 논문에서는, 고체냉매 냉각환경에서의 실험을 통해 SNR을 향상시키고 반복적인 켄치 실험을 통하여 AE 센서에 사용된 압전 세라믹스의 두께를 변화시키기에 따라서 실제 초전도 선재의 손상에 대한 신호 검출 가능성 및 이에 따른 검출감도에 관하여 연구하였다.

#### 2. 압전소자의 제작 및 특성 분석

##### 2.1. 압전소자의 제조

본 연구에서 사용한 원료분말은 PbO(Aldrich, 99.9%), ZrO<sub>2</sub>(Aldrich, 99.9%), TiO<sub>2</sub>(High Purity Chemicals, 99.9%), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(High Purity Chemicals, 99.9%) 그리고 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Aldrich, 99.9%)이며, 전자저울을 사용하여 다음 조성에 따라 원료분말을 ± 0.1 mg의 오차 범위에서 정밀하게 평량하였다:  $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3 + 0.2 \text{ wt}\% Cr_2O_3 + 1.0 \text{ wt}\% Nb_2O_5$ . 평량한 분말의 혼합은 HDPE jar에서 지르코니아 불을 사용하여 습식으로 24시간 실시하였다[7]. 혼합된 시료는 120°C에서 건조한 후, 850°C에서 2시간 하소하였다. 하소분말은 지르코니아 불을 사용하여 습식으로 48시간 분쇄하고 충분히 건조시킨 후 12.5 mm 몰드로 일축 성형하여 disc 시편을 제작하였다. 성형시편은 승온 속도를 분당 5°C로 하여 1200°C로 2시간 소결하였다. 소결된 시편은 양면을 은 전극 처리하여 120°C의 실리콘 절연유 내에서 2.5 kV/mm의 직류 전압을 15분 동안 인가하여 분극하였다[8].

또한, 압전세라믹스의 형상에 따른 AE센서 특성을 고찰하기 위해 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 그리고 3.0 mm의 두께로 성형한 압전소자를 제작하였다.

##### 2.2. AE 센서의 제작 및 특성평가

그림 1은 본 실험에 사용된 AE 센서의 구조와 AE 센서의 특성 평가를 위한 실험 장비 셋업을 개략적으로 도시한 것이다. 분극이 끝난 시편 양면의 은 전극에 테프론으로 절연된 리드선을 땀납으로 붙인 후, 구리박 위에 고정시키고 구리 캡으로 봉하였다. 구리박 밑면에는 황동판을 내마모판으로 사용하여 시편을 보호하도록 하였다. 세라믹 시편은 열적 충격에 매우 취약하므로 시편 내부에 크랙이 발생하거나 압전 특성이 저하되지 않도록 짧은 시간 안에 납땀을 실시하였다. 조립된 각각의 센서에 Arbitrary waveform generator (Agilent, 33220A) 를 통해 다양한 주파수 영역대의 진동을 인가하고 Vibration exciter (B&K, type 4809)에 AE센서를 부착하여 디지털오실로스코프로 신호를 저장하였다.

<sup>1</sup>학생회원 : 고려대학교 신소재공학과 초전도연구실 그룹

<sup>2</sup>정 회 원 : 고려대학교 신소재공학과 부교수

<sup>3</sup>비 회 원 : 한국세라믹기술연구원 연구원

<sup>4</sup>학생회원 : 연세대학교 전기공학과 초전도응용 연구실

<sup>5</sup>정 회 원 : 연세대학교 전기공학과 교수

\*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr

원고접수 : 2010년 09월 01일

심사완료 : 2010년 09월 13일

게재확정 : 2010년 09월 13일

2.3. 반복 켄치 실험

제작된 AE 센서를 사용하여 초전도 선재의 손상을 감지하고 안정성을 진단하기 위한 반복 켄치 실험을 수행하였다. 반복켄치 실험은 액체냉매의 끓음이나 냉동기 작동에 의한 잡음 신호 발생을 최소화하기 위하여 고체 질소 냉각 환경에서 실시되었으며, 그림 2는 반복 켄치 실험을 수행하기 위한 고체질소 냉각 시스템에 대한 개략도이다. AE 센서로부터 출력되는 신호는 디지털 오실로스코프 (Lecroy, Wavejet 324A)로 모니터링 됨과 동시에 Data acquisition (DAQ) 시스템을 통해 순차적으로 저장하였다. 고체질소 냉각 시스템은 AE 센서가 부착된 모듈을 감싸고 있는 내부 고체질소 용기와 복사열침입을 줄이기 위한 복사차폐막, 전류리드 (Current leads), 고체질소 용기 내부의 압력을 확인할 수 있는 디지털 압력계이지 그리고 질소를 고화시키기 위한 극저온 냉동기 (Leybold, Coolpower 10 MD) 및 Voltage tap 과 AE 센서가 통과할 수 있는 Feed-through 로 구성되었다.

반복켄치 실험은 고체질소가 58 K를 유지하는 온도에서 수행하였으며, 이 때 초전도 선재의 임계전류값 ( $I_c$ ) 은 296 A 였다. 켄치 실험을 위하여 다음과 같은 3단계로 구분되는 전류를 인가하였다: 1) 5 초간 54 A 의 동작전류 ( $I_{op}$ ), 2) 0.5 초간 450 A 의 사고전류 ( $I_{over}$ ), 3) 초전도 선재의 전압이 완전히 회복되기까지의 수 초 동안 54 A 의 동작전류 ( $I_{op}$ ). 각각의 켄치 테스트는 충분한 간격을 두어 온도가 초기 동작온도인 58 K 로 완전히 회복된 후에 임계전류를 측정하였다.

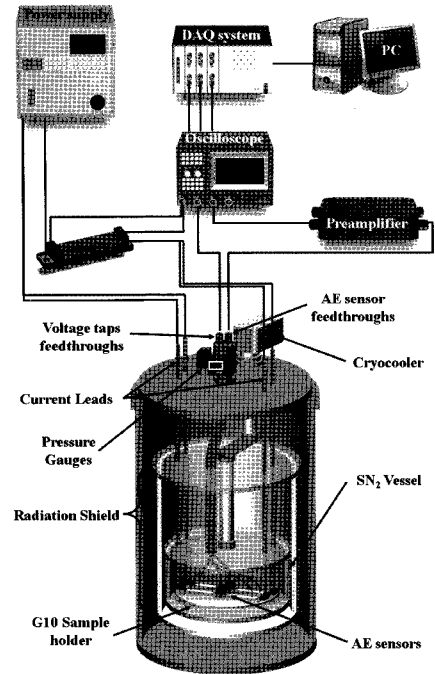


Fig. 2. Schematic diagram of SN<sub>2</sub> cooling system and the experimental setup for the repetitive quench tests.

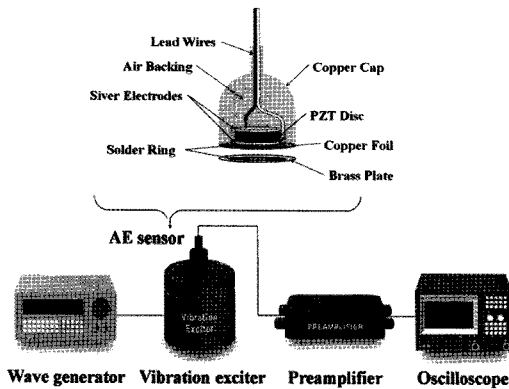


Fig. 1. Schematic diagram of the AE sensor assembly and experimental setup.

3. 결과 및 토의

3.1. 압전체의 두께에 따른 센서 특성

그림 3은 각각 두께를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm 로 다르게 하여 성형한 PZT 세라믹 시편 (반경 = 1cm)의 임피던스 측정 결과를 나타낸 것이다. 또한 두께가 다른 각각의 압전 세라믹 시편을 사용하여 AE 센서를 제작하였고, 각각의 센서의 최소 공진 주파수 및 고조파를 측정하여 표 2에 정리하였다.

제작된 AE 센서의 공진주파수는 압전소자의 형상에 의존하며, 임피던스 측정법에 의해 정의되는 공진주파수 ( $f_r$ ) 과 압전소자의 두께 ( $t$ ) 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$N_t = f_r \times t \tag{1}$$

$$f_n = (2n+1)f_r/4$$

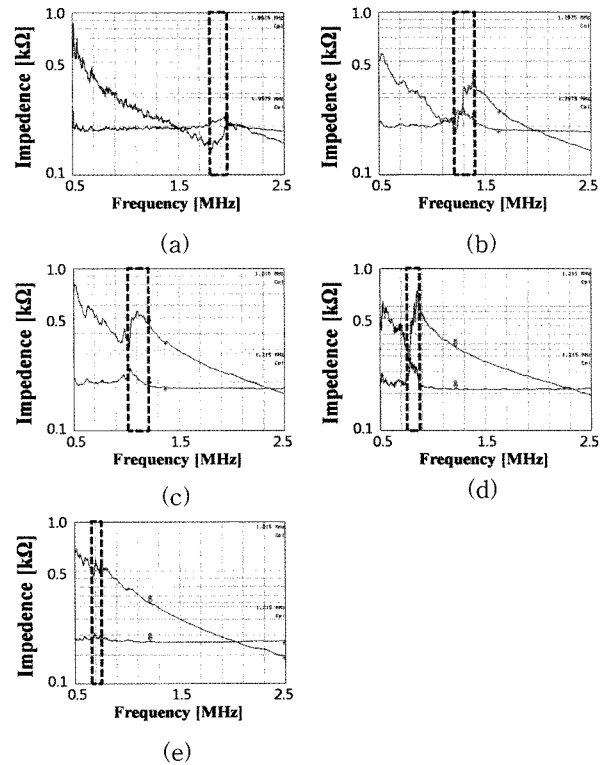


Fig. 3. Impedance curves of Pb(Zr<sub>0.54</sub>Ti<sub>0.46</sub>)O<sub>3</sub> + 0.2 wt.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0.2 wt.% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> discs sintered at 120 0C for 2 h with different thicknesses: (a) 1.0, (b) 1.5, (c) 2.0, (d) 2.5 and (e) 3.0 mm.

이때, 주파수 상수 ( $N_t$ ) 는 압전소자의 조성, 소결조건 등에 의한 고유값으로 압전소자의 형상과 무관하다.  $f_n$  은 AE 센서의 최소공진주파수 ( $n = 0$ ) 및 고조파 ( $n = 1, 2, 3$ ) 으로, 실질적인 센서의 감도특성에 대한 척도가 된다.

Table 2. The minimum resonance and its harmonic frequencies of the PZT ceramics.

t (mm)	$N_t$ (mm·kHz)	$f_0$ (kHz)	Harmonic frequencies		
			$f_1$ (kHz)	$f_2$ (kHz)	$f_3$ (kHz)
1.0	1806	452	1355	2258	3161
1.5	1822	304	911	1518	2126
2.0	2062	258	773	1289	1804
2.5	1953	195	586	977	1367
3.0	2031	169	508	846	1185

그림 4는 Arbitrary waveform generator (Agilent, 33220A)를 통해 입력된 다양한 주파수 영역대의 진동을 Vibration exciter (B&K, type 4809)에 각각의 제작된 AE센서를 부착하여 측정한 주파수 응답 특성 곡선이다. AE 센서를 구성하는 압전 소자의 두께가 감소할수록 높은 주파수 영역에서 보다 높은 감도의 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.3. 반복퀀치 실험 결과

그림 5는  $I_{op} = 54 A$ ,  $I_{over} = 450 A$ 에서 실시된 반복퀀치 실험의 결과이다. 그림 5(a)는 인가된 전류 펄스(점선)와 그로 인해 나타나는 전압과 줄열선속을 보여준다. 줄열선속( $q$ )의 최대값은 2회의 퀀치 실험까지는  $144.9 W/cm^2$ 으로 동일하지만 3회와 4회에서는 각각  $171.6 W/cm^2$ 과  $215.7 W/cm^2$ 으로 급격하게 증가하였다. 그림 5(b)~(e)는 각각의 퀀치 실험 중에 발생하는 AE 신호의 파형을 나타낸 것이다. AE 센서는 1.0 mm 두께의 압전소자를 사용해 제작하였다. 최초 2회의 퀀치 실험에서는 AE 신호가 나타나지 않으나, 3회째의 퀀치 실험 중에 2개의 AE 이벤트가 발생하였다. 2회까지의 퀀치 실험에서 과전류를 인가하는 동안에 도달하는 전압과 줄열선속이 동일하고, AE 신호가 발생하지 않은 것은 고온 초전도 선재가 과전류에 의해 상전도 전이를 나타내지만, 그로 인해 어떠한 기계적인 응력에 의한 손상이 발생하지 않았음을 보여준다. 3회째의 퀀치 실험중에 발생한 각각의 AE 이벤트의 최대진폭은 0.933 V와 0.276 V로 최초의 AE신호 발생 이후에도 고온 초전도 선재가 여전히 기계적인 응력을 받고 있으며, 이에 따라 손상이 진행되고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 58 K의 고체질소 냉각환경에서 반복퀀치 실험 전과 후에 나타난 고온 초전도 선재의 임계 전류 값의 변화를 보여준다. 선재의 임계전류 값은 3번째 퀀치 테스트 후에 267 A로 반복퀀치 실험을 실시하기 전의 임계전류 값인 296 A에 비해 10% 감소하였다. 그러나 반복퀀치 실험(그림 5)과 임계전류 측정(그림 6)의 결과로부터 고온 초전도 선재는 3회의 반복퀀치 테스트로부터 부분적으로 손상을 입었지만 여전히 초전도성을 나타냄을 알 수 있다. 또한 그림 5(b)에 나타나듯이, 4회째의 퀀치 테스트에서는 이미 3번째 퀀치 테스트에서 손상을 입은 선재에서는 AE 신호가 발생하지 않았다.

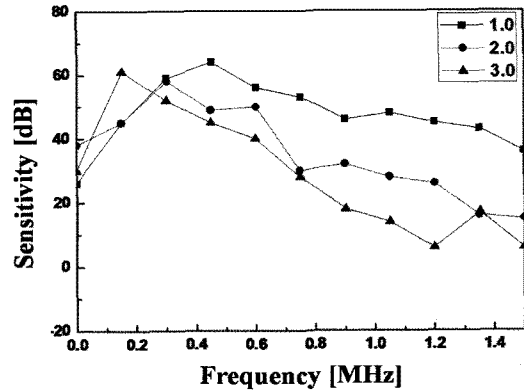


Fig. 4. Frequency response characteristics of the AE sensors with PZT discs of different thicknesses.

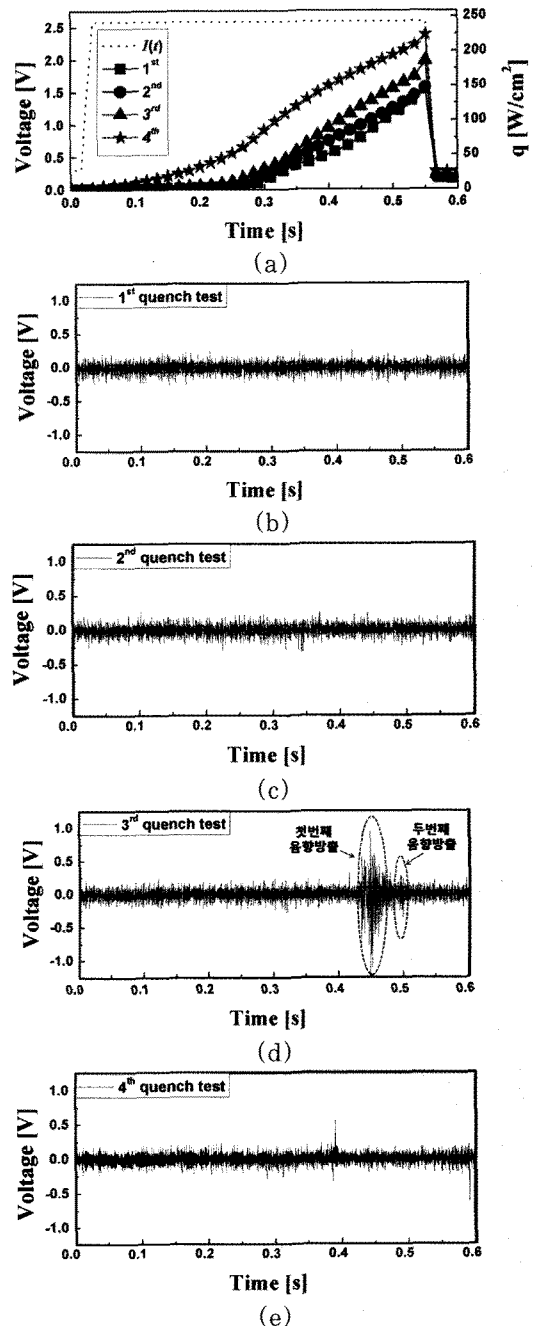


Fig. 5. Voltage and AE signals recorded during the repetitive quench tests at  $I_{op} = 54 A$  and  $I_{over} = 450 A$  in  $SN_2$  cooling system at 58 K.

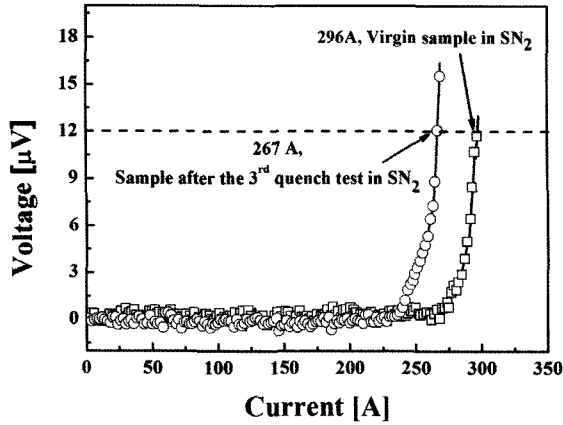


Fig. 6.  $V-I$  curves of the virgin sample and sample after the 3<sup>rd</sup> quench test in the  $SN_2$  cooling system (58 K).

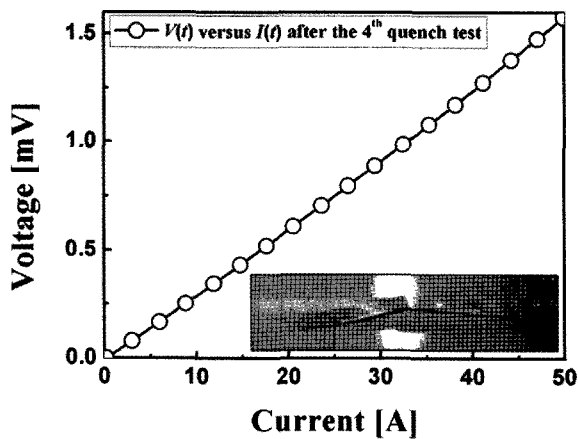


Fig. 7.  $V-I$  curves of the sample after the 4<sup>th</sup> quench test.

그림 7은 4회째의 퀀치 테스트 후 샘플의 전압-전류 곡선 및 샘플의 사진이다. 그림에 보여지는 바와 같이 샘플은 상전도 특성을 보이며, 이는 반복퀀치 테스트에 의해 초전도층이 완전히 손상됨에 따른 국부적인 열 발생이 초전도층과 안정화재층 사이의 박리를 진행시켰기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1200°C에서 2시간 소결하여 합성한 압전세라믹스( $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46}) + 0.2 \text{ wt.}\% Cr_2O_3 + 1.0 \text{ wt.}\% Nb_2O_5$ )를 여러 다른 두께(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mm)로 성형한 후 이를 사용하여 제작된 AE 센서의 주파수 응답 특성을 관찰한 결과, 압전소자의 두께가 감소할수록 높은 주파수에서 높은 감도를 나타냈다. 또한, 1.0 mm 두께의 압전소자를 사용하여 제작된 AE 센서로 반복퀀치 실험 중에 나타나는 초전도 선재의 손상과 AE 신호의 검출 가능성에 대하여 검증실험을 실시하였다. 실험 결과, AE 센서는 초전도 선재의 퀀치와 함께 나타나는 국부적인 열 발생으로 인한 선재의 박리 또는 균열 성장 등의 변화를 효과적으로 감지할 수 있었다. 이러한 결과를 활용하여 실제 초전도 응용기기 내부의 초전도 선재의 손상을 감지하고 안정성을 진단하기 위한 AE 시스템의 개발에 크게 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 중견연구자사업인 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No.2009-0085369)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. G. Lee, H. M. Kim, J. Jankowski and Y. Iwasa, "Detection of 'hot spots' in HTS coils and test samples with acoustic emission signals", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, Issue 2, pp. 1298-1301, June, 2004.
- [2] H. M. Kim, K. B. Park, B. W. Lee, I. S. Oh, J. W. Sim, O. B. Hyun, Y. Iwasa and H. G. Lee, "A stability verification technique using acoustic emission for an HTS monofilar component for a superconducting fault current limiter", Superconductor Science and Technology, Vol. 20, Issue 6, pp. 506-510, 2007.
- [3] H. Nomura, K. Takahisa, K. Koyama and T. Sakai, "Acoustic emission from superconducting magnets", Cryogenics, Vol. 17, Issue 8, pp. 471-481, 1977.
- [4] C. Schmidt, G. Pasztor, "Acoustic emission from NbTi superconductors during flux jump", Cryogenics, Vol. 19, Issue 10, pp. 608-610, 1979.
- [5] H. G. Lee, J. Bascuñan and Y. Iwasa, "A High-Temperature Superconducting Double-Pancake Insert for an NMR Magnet", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, Issue 2, pp. 1546-1549, June, 2003.
- [6] H. M. Kim, K. B. Park, B. W. Lee, I. S. Oh, J. W. Sim, O. B. Hyun, Y. Iwasa and H. G. Lee, "A stability verification technique using acoustic emission for an HTS monofilar component for a superconducting fault current limiter", Superconducting Science and Technology, Vol. 20, Issue 6, pp. 506, 2007.
- [7] I. Grinberg, V. R. Cooper, and A. M. Rappe, "Relationship between local structure and phase transitions of a disordered solid solution", Nature Vol. 419, pp. 909-911, 2002.
- [8] J. H. Kim, J. B. Song, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Paik, W. S. Kim and H. G. Lee, "Fabrication of a High Performance Acoustic Emission (AE) Sensor to Monitor and Diagnose Disturbances in HTS Tapes and Magnet", Metals and Materials International, Vol. 16, pp. 109-113, 2010.



**김경준(金景準)**  
1983년 9월 8일생, 2008년 고려대 공대  
신소재공학부 졸업, 2010년 동 대학원  
신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동  
대학원 신소재공학과 박사과정.



**장재영(張宰榮)**  
1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대  
전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원  
전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학  
원 전기전자공학과 박사과정.



**김주형(金周亨)**  
1979년 10월 30일생, 2006년 인천대 공대  
신소재공학과 졸업, 2010년 고려대 대학  
원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재  
(주)삼화콘덴서 연구원.



**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), 1986  
년 ~ 1988년 Ohio Cleveland State Univ.  
전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전  
기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도·저  
온공학회 회장.



**송정빈(宋廷彬)**  
1978년 11월 12일생, 2005년 고려대 공  
대 신소재공학부 졸업, 2007년 동 대학  
원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재  
동대학원 신소재공학과 박사과정.



**이해근(李海根)**  
1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대  
재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대  
대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995  
년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사),  
현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.



**백중후(白種厚)**  
1965년 3월 5일생, 1987년 고려대 공대  
재료공학과 졸업, 1999년 동 대학원 재  
료 공학과 졸업(공학박사), 현재 한국세  
라믹 기술원 광·전자세라믹본부 본부장.