무절연 고온 초전도 레이스트랙형 코일의 직선구간 압력변화에 따른 열적 안정성 연구

A Study on Thermal Stability of the Non-insulated HTS Racetrack-type Coil Under Various External Pressures Applied to Straight Sections

권오준¹, 김광록¹, 최윤희¹, 양동규¹, 김영균¹, 이태성³, 고태국⁴, 이해근^{2,*}

O. J. Kwon¹, K. L. Kim¹, Y. H. Choi¹, D. G. Yang¹, Y. G. Kim¹, T. S. Lee³, T. K. Ko⁴, and H. G. Lee^{2,*}

Abstract: An HTS racetrack-type coil without turn-to-turn insulation was characterized by critical current, sudden discharge, and over-current tests with respect to external pressures applied to the straight sections of the coil. The thermal stability of the non-insulated HTS racetrack-type coil was remarkably enhanced with increasing external pressure applied to the straight sections of racetrack-type coil. Furthermore, over-current test results confirmed that the non-insulated HTS racetrack-type coil with increased turn-to-turn thermal contact has the potential to be manufactured into field coils of HTS wind turbine generators with highly enhanced thermal and electrical stabilities.

Key Words: field coil, HTS racetrack-type coil, no-insulation, thermal contact, wind turbine

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료 사용이 급증함에 따른 환경문제 해결 및 에너지 자급을 향상을 위해서 청정한 자연에너지를 축으로 하는, 효율적이며 신뢰성 높은 대체 에너지 시스템 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 대체 에너지 가운데 풍력은 신재생 청정 에너지원임과 동시에 효율성이 높은 자원 중의 하나이기 때문에 국내외적으로 풍력 발전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 관련 시장 또한 급속도로 성장하고 있다 [1-3]. 따라서 풍력발전 시스템의 대용량화 추세에 따라 건설비용 절감 및 운용의 경제성 확보를 위하여 고효율, 고부가가치 기술로 각광받고 있는 초전도 응용기술을 대용량 풍력발전시스템에 적용하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 특히 높은 임계 전류 밀도와 고자기장 발생이 가능한 2세대 고온초전도체를

풍력발전기에 적용하게 되면 기존의 동일 용량 상전도 발전기에 비해 무게와 크기를 약 1/3까지 낮출 수 있으며 건설비용을 60 %까지 감소시킬 수 있기 때문에 2세대 초전도체를 이용한 초전도 응용기술은 10 MW급 이상의 대형 풍력발전기 개발에 있어 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다 [2-4].

최근 국내외 여러 연구기관에서는 2세대 고온초전도 코일의 턴과 턴 사이 절연물질을 제거하는 무절연 권선법에 대한 다양한 연구 결과를 소개 하였다 [5-10]. 무절연 권선법은 절연 되어 있지 않은 인접 턴 간의 열 접촉을 통해 코일의 열적 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 소형화된 코일의 제작이 가능하기 때문에 이를 풍력발전기 회전자의 초전도 마그넷 제작에 활용하게 된다면 열적 안정성이 극대화되고 컴팩트한 초전도 풍력발전기 제작이 가능하게 될 것으로 기대하고 있다. 그러나 일반적으로 레이스트랙 형상을 갖는 풍력 발전기용 초전도 코일은 직선구간에서 턴 간 물리적 밀착이 잘 이루어지지 않게 되며 [11-15], 특히 무절연 권선법이 적용된 무절연 코일의 열적 안정성은 인접 턴 간의 열 접촉이 중요한 관건으로, 무절연 코일을 초전도 풍력발전기에 성공적으로 적용하기 위해서는 무절연 레이스트랙 코일의 직선구간 열 접촉에 따른 열적 안정성 분석이 필수적이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 무절연 레이스트랙형 코일의 직선구간 밀착정도에 따른 코일의 열적 안정성 평가를 위하여, 임계전류, 급방전 및 과전류 테스트를 통해 턴과 턴 사이의 절연물질을 제거한 GdBCO 레이스트랙 팬케이크 코일의 직선구간에 가해지는 압력에 따른 열적/전기적 특성을 조사 하였다. 또한 테스트 결과를 바탕으로 턴과 턴 사이의 절연물질이 제거된 고온 초전도 레이스트랙 코일의 대형 풍력 발전 시스템의 초전도 코일로써의 적합성 여부를 판단하였다.

2. 실험방법

표 1은 본 연구에서 사용한 서남의 GdBCO coated conductor 선재의 사양을 요약하여 나타낸 것이다. 선재는 기관-완충층-GdBCO 초전도층의 순서로 다층 박막구조를 이루고 있으며, 이 주변을 구리 (Cu) 안정화 재층이 둘러싸고 있고, 안정화재층 양면에는 납 (Pb)층과 함께 황동 (Brass)이 적층되어 있다.

그림 1은 제작된 레이스트랙형 팬케이크 코일과 코일의 직선부 가압을 위한 장치의 사진이다. 제작된 코일에 대한 사양은 표 2에 요약하여 나타내었다. 레이스트랙형 팬케이크 코일은 fiber-reinforced bakelite 보빈에 GdBCO 선재를 총 30 턴 권선하여 제작하였으

¹학생회원 : 고려대학교 신소재공학과

²정 회 원 : 고려대학교 신소재공학과

³학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과

⁴정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과

*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr

원고접수 : 2012년 08월 16일

심사완료 : 2012년 09월 05일

게재확정 : 2012년 09월 05일

Table 1. Specifications of the GdBCO CC tape.

Parameters	Values
제조회사	SuNAM
너비	~4.12 mm
두께	~0.21 mm
황동층 두께	40 x 2 μm
납층 두께	15 x 2 μm
구리 안정화재층 두께	20 x 2 μm
완충층 두께	0.085 μm
GdBCO 초전도층 두께	0.9 μm
Hastelloy 기관 층 두께	60 μm

Table 2. Specifications of the GdBCO racetrack pancake coil.

Parameters	Values
총 선재 길이	8.5 m
턴간 절연 방법	No insulation
턴수	30
곡선구간 내경	50 mm
곡선구간 외경	62.6 mm
직선구간 길이	50 mm
코일 상수	0.49 mT/A
인덕턴스	140 μH

며, 코일의 직선구간 길이는 50 mm 이며, 곡선구간의 내경 및 외경은 각각 50 mm 와 62.6 mm이다. 본 실험에서는 코일의 직선구간에 대한 턴간 밀착 정도의 변화를 주기위해 토크 렌치를 사용하여 다양한 압력 ($P = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ MPa)을 가해주었다. 코일의 중심 자장은 digital signal processing (DSP) 가우스미터를 사용하여 측정 하였으며, 모든 실험의 전류, 전압, 자장은 data acquisition (DAQ) 시스템을 통해 관찰 및 기록하였다.

그림 2는 본 실험 장치의 등가회로 모델이다. 만약 무절연 코일에서 퀵치가 발생할 경우 전류는 초전도층을 따라 코일의 권선 방향으로 흐를 뿐만 아니라 절연되어 있지 않은 인접한 층을 통하여 코일의 방사상 방향으로도 흐를 수 있다. 이러한 무절연 코일의 저항 비등방성은 코일의 자체 인덕턴스 (L_{HTS}), 코일의 권선 방향 저항 (R_θ), 턴과 턴 사이의 방사상 방향 저항 (R_R)으로 표현 할 수 있다 [5].

3. 결과 및 토의

3.1. 임계전류 (I_c) 특성

그림 3은 턴과 턴 사이의 절연물질을 제거한 GdBCO 레이스트랙 코일의 직선구간에 가해지는 압력에 따른 $V-I$ 특성을 보여준다. 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ criterion을 기준으로 측정된 코일의 임계전류 (I_c)는 압력이 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 MPa 일 때 각각 108.2, 110.5, 121.3, 123.8, 124.6 A로 측정되었다 (그림 4).

Fig 1. GdBCO racetrack-type pancake coil with applied pressures in the straight sections.

Fig. 2. Equivalent circuit diagram which consists of a power supply, a test coil in cryogenic environment (shaded box with dashed outline), and a shunt resistor [5].

즉, 코일의 직선부위에 가해지는 압력이 커질수록 임계 전류가 증가한다는 것을 알 수 있다.

본 실험을 통해 압력이 증가함에 따라 턴과 턴 사이의 물리적인 밀착이 증가되고, 이에 따라 절연 되어 있지 않은 인접한 층으로 과전류가 효과적으로 우회 되어, 결과적으로 코일의 열적 안정성이 향상되었다는 것을 보여 준다 [16-17]. 그러나 0.5 MPa 이상의 압력이 가해지게 되면 임계전류가 더 이상 크게 증가 하지 않는 것을 알 수 있으며, 이는 0.5 MPa의 압력으로도 턴과 턴 사이의 열 접촉이 충분히 확보되었다는 것을 의미한다. 따라서 턴과 턴 사이의 절연물질을 제거한 무절연 레이스트랙 코일의 경우 직선구간에 적절한 크기의 압력을 가해 주게 되면 코일의 열적 안정성을 충분히 향상 시켜줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 코일의 임계전류시험을 하는 동안 동시에 측정된 코일의 중심 자기장을 보여준다. 코일의 자기장은 전류가 증가하는 동안 코일상수 (0.49 mT/A)에 따라 증가하였으며 대략 95 A에서부터 포화되는 모습을 보이고 전류의 증가와 상관없이 대략 47.3 mT의 크기로 유지되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 초전도 상태를 벗어나는 과전류가 무절연 코일에 인입 되면 전류가 초전도층을 따라 흐를 뿐만 아니라 절연되어 있지 않은 인접층으로 우회하여 흐르기 때문이다. 하지만 모든 압력 조건에서 코일의 자기장은 큰 차이 없이 비슷한 특성을 나타내는 것을 알 수 있는데, 이는 무절연 레이스트랙형 코일에서 생성되는 자기장의 경우 코일 직선 구간에 가해지는 압력 증가가 측정오차를 벗어날 만큼의 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

Fig. 3. V - I curves of the test coil under various external pressures applied to the straight sections.

Fig. 4. Critical currents (I_C) of the test coil with respect to pressures applied to the straight sections.

3.2. 급방전 특성

그림 6은 무절연 레이스트랙 코일의 급방전 테스트 결과를 보여준다. 운전전류 (I_P)는 60 A를 유지하였으며, 코일의 자기장이 정상상태를 유지하고 있을 때 전원 공급 장치의 전원을 차단하여 전류의 급방전에 따른 코일의 자기장 변화를 관찰하였다. 각 압력에서의 시험 결과 비교를 위하여 측정되어진 모든 자기장 값을 60 A에서의 자기장 값에 대해 정규화시켰으며, 정규화된 값이 0.37이 되는 시간 지점을 τ (자기장의 감쇄 시간)로 결정하였다. τ 는 코일에 가해지는 압력이 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 MPa로 증가함에 따라 각각 4.25, 6.11, 7.6, 7.75, 7.75 초로 나타났다. 즉, 코일의 직선 구간에 가해지는 압력이 커짐에 따라 τ 값 역시 증가함을 보여준다. 코일에는 임계전류 이하의 전류가 흐르고 있기 때문에 코일의 권선 방향 저항 R_θ 는 0 이라고 할 수 있으며, 따라서 식 $R_R = L/\tau$ 과 측정되어진 τ 및 코일의 인덕턴스 ($L = 140 \mu\text{H}$)를 이용하면 코일의 방사상 방향 저항 R_R 을 구할 수 있다. 이를 통하여 계산한 저항값 (R_R)은 $P = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 \text{ MPa}$ 일 때, $R_R = 0.033, 0.023, 0.019, 0.018, 0.018 \text{ m}\Omega$ 임을 알 수 있다. 즉, τ 의 변화를 통하여 직선구간에 가해지는 압력이 코일의 턴과 턴 사이의 저항인 R_R 값을 감소시킨다는 것을 보여준다. 또한 앞서 언급한 임계전류 값과 마찬가지로 0.5 MPa보다 더 큰 압력이 가해졌을 때 τ 값이 거의 변하지 않는 모습을 보이는데 이는 적절한 가압을 주었을 때, R_R 값이 충분히 감소한다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 무절연 코일의 방

Fig. 5. Axial center field vs. current curves of the test coil under various external pressures applied to the straight sections.

Fig. 6. Normalized axial center field vs. time curves of the test coil measured from sudden discharge testing at 60 A.

전시 코일의 전류가 정상적인 코일의 권선 방향뿐만 아니라 절연되어 있지 않은 코일의 턴과 턴 사이 방향인 방사상 방향으로 소멸 한다는 것을 보여주며, 이를 통해, 직선부 인접 턴간의 저항 R_R 이 충분히 감소할 수 있는 적절한 압력이 가해지게 되면, 코일의 열적/전기적 안정성이 크게 향상 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3. 열폭주 (thermal runaway) 조건

그림 7은 무절연 레이스트랙 코일에 어떠한 압력도 가하지 않았을 때의 과전류 테스트 결과를 보여준다. 운전전류 (I_P)에 도달하는 동안 전류는 1 A/s로 증가되었으며, 운전전류는 전압이 일정한 크기로 유지 될 때까지 지속되었다. 만약 코일의 전압이 급격하게 증가하는 열폭주 (thermal runaway) 현상이 발생할 경우 코일의 영구적인 손상을 방지하기 위해 흐르는 전류를 차단시켰다. 테스트가 진행되는 동안 코일은 대략 95 초가 되는 지점에서 처음으로 전압이 상승하기 시작하였으며 운전전류가 146 A ($1.35I_C$)에서 지속되면 전압이 20.4 mV의 일정한 크기로 유지되는 것을 알 수 있었다. 코일의 전압이 일정한 크기로 유지되고 있다는 것은 과전류에 의해 발생하는 줄열과 액체 질소에 의한 냉각이 열적 평형 상태를 이루고 있다는 것을 의미한다. 코일에서 생성되는 자기장의 경우 95 초가 되는 지점에서부터 포화되기 시작했으며 대략 47.3 mT의

Fig. 7. Over-current test results of the test coil at $P = 0$ MPa.

Fig. 8. Over-current test results of the test coil at $P = 0.5$ MPa.

크기로 유지되었다. 그러나 147 A ($1.36I_c$)의 운전전류가 인가되면, 코일의 전압이 평형상태를 유지하지 못하고 급격하게 상승하는 열폭주 현상이 나타났으며 동시에 자기장이 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 자기장이 급격하게 떨어지는 현상은 절연 되어 있지 않은 턴과 턴 사이로 단락이 발생했다는 것을 의미한다 [10].

그림 8은 코일의 직선부위에 0.5 MPa의 압력을 가하였을 때의 과전류 테스트 결과이다. 결과를 보면 앞서 수행되어진 조건에 비하여 3배 이상 증가한 433 A ($4.01I_c$)의 운전전류를 인가함에도 불구하고 열폭주 현상이 발생하지 않고 전압이 22.63 mV의 크기로 일정하게 유지되었으며, 자기장은 압력을 가하지 않았을 때와 마찬가지로 95 초 지점에서부터 대략 47.3 mT의 크기로 포화되고 급격하게 감소하는 모습 없이 지속되는 것을 알 수 있다. 하지만 $I_p = 434$ A ($4.02I_c$)가 되면 코일의 열폭주 현상과 자기장이 급격하게 떨어지는 현상이 관찰된다. 즉, 본 실험 결과는 코일의 직선구간에 0.5 MPa의 압력을 가해주었을 때 코일의 열적 안정성이 크게 향상되었다는 것을 보여주며, 이는 무절연 레이스트랙 코일의 열적 안정성 향상을 위해서는 직선부에 적절한 크기의 압력을 가하는 것이 중요하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 무절연 GdBCO 레이스트랙형 코일의 턴 간 밀착정도에 따른 열적 안정성을 평가하기 위하여, 코일의 직선 구간에 가해지는 압력에 따른 임계전

류, 급방전 및 과전류 특성을 조사하였다. 무절연 코일은 직선구간에 가해지는 압력의 크기가 커질수록 임계전류 (I_c)가 향상되었으며, 코일의 턴과 턴 사이 저항 (R_R)이 감소함을 보여주었다. 그러나 임계전류와 R_R 값은 0.5 MPa보다 더 큰 압력이 가해졌을 때 크게 변하지 않는 모습을 보였고, 이는 적절한 압력으로 턴과 턴 사이의 열 접촉이 충분히 확보 되었다는 것을 시사한다. 또한 열폭주가 발생하는 전류는 압력이 가해지지 않았을 때보다 0.5 MPa의 압력을 가하였을 때 대략 3배가 증가함을 보여주었다. 따라서, 무절연 레이스트랙의 경우 직선구간에 적절한 크기의 압력이 가해지게 되면 R_R 이 감소하게 되고 켄치시의 과전류와 줄열이 효과적으로 분산 되어 결과적으로 코일의 열적 안정성을 크게 향상시킨다는 것을 알 수 있으며, 턴 간 열 접촉이 향상된 무절연 레이스트랙형 코일은 열적 안정성이 향상된 대형 초전도 풍력 발전 시스템의 개발을 가능하게 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 에너지 국제공동기술개발사업인 정부(지식경제부)의 재원으로 한국에너지기술평가원 (No.20118520020020)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] G. M. Joselin Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, "A review of wind energy technologies", *Renew Sustain Energy Rev.* vol. 11, pp. 1117-1145, 2007.
- [2] A. B. Abrahamsen, N. Mijatovic, E. Seiler, T. Zirngibl, C. Trholt, P. B. Nrgd, N. F. Pedersen, N. H. Andersen, and J. stergrd, "Superconducting wind turbine generators", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.23, pp. 034019-034026, 2010.
- [3] G. Snitchler, B. Gamble B, C. King, and P. Winn, "10 MW class superconductor wind turbine generators", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, pp. 1089-1092, 2011.
- [4] S. S. Kalsi, K. Weeber, H. Takesue, C. Lewis, H. W. Neumueller, and R. D. Blaugher, "Development status of rotating machines employing superconducting field windings", *Proc. IEEE*, vol. 92, pp. 1688-1704, 2004.
- [5] S-Y. Hahn, D. K. Park, J. Bascuán, and Y. Iwasa, "HTS Pancake Coils without Turn-to-Turn Insulation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, pp. 1592-1595, 2011.
- [6] S-Y. Hahn, D. K. Park, J. Voccio, J. Bascuán, and Y. Iwasa, "No-Insulation (NI) HTS Inserts for > 1 GHz LTS/HTS NMR Magnets", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 22, pp. 4302405-4302409, 2011.

- [7] Y. G. Kim, S-Y. Hahn, K. L. Kim, O. J. Kwon, and H. G. Lee, "Investigation of HTS Racetrack Coil without Turn-to-Turn Insulation for Superconducting Rotating Machines", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, pp. 5200604-5200607, 2012.
- [8] S-J. Choi, H. C. Jo, Y. J. Hwang, S-Y. Hahn, and T. K. Ko, "A Study on the No Insulation Winding Method of the HTS Coil", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 22, pp. 4904004-490407, 2012.
- [9] Y. H. Choi, S-Y. Hahn, J. B. Song, D. G. Yang, and H. G. Lee, "Partial Insulation of GdBCO Single Pancake Coils for Protection-Free HTS Power Applications", Supercond. Sci. Technol., vol. 24, pp. 125013-125018, 2011.
- [10] Y. H. Choi, K. L. Kim, O. J. Kwon, D. H. Kang, J. S. Kang, T. K. Ko, and H. G. Lee, "The Effects of Partial Insulation Winding on the Charge-Discharge Rate and Magnetic Field Loss Phenomena of GdBCO Coated Conductor Coils", Supercond. Sci. Technol., vol. 25, pp. 105001, 2012.
- [11] D. G. Yang, J. B. Song, K. L. Kim, H. G. Lee, M. W. Park, and H. G. Lee, "Quench Initiation and Propagation in GdBCO Racetrack Pancake Coil for Large-Scale Rotating Machines", J. Supercond. Nov. Magn. vol. 25, pp. 1071-1076, 2012.
- [12] J. B. Song, K. L. Kim, D. G. Yang, J. Y. Jang, T. K. Ko, M. C. Ahn, and H. G. Lee, "Normal Zone Initiation and Propagation Characteristics of a Solid Nitrogen Cooled GdBCO Racetrack Pancake Coil", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 22, pp. 4701704-4701707, 2012.
- [13] K. L. Kim, J. B. Song, D. G. Yang, Y. H. Choi, W. J. Kim, S. H. Kim, and H. G. Lee, "The Effects of External Pressure on the Thermal and Electrical Properties of Stacked GdBCO Coated Conductor Tapes", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, pp. 4701804-4701807, 2012.
- [14] K. Ikizawa, N. Takasu, and Y. Murayama, "Instability of Superconducting Race Track Magnets", IEEE Trans. Magn., vol. 27, pp. 2128-2131, 1991.
- [15] T. Yazawa, M. Urata, G. R. Chandratilleke, and R. Maeda, "Racetrack coil instability resulting from friction head generation at fixtures", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, pp. 312-315, 1993
- [16] P. W. Bridgman, "The effect of pressure on the thermal conductivity of metals", Proc. Am. Acad. Arts. Sci., vol. 57, pp. 77-127, 1922.
- [17] C. Starr, "The pressure coefficient of thermal conductivity of metals", Phys. Rev., vol. 54, pp. 210-216, 1938.

저 자 소 개

권오준 (權五俊)

1986년 8월 21일생, 2011년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.

김광록 (金桴祿)

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

최윤혁 (崔倫赫)

1983년 9월 24일생, 2009년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업, 2012년 고려대학교 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정.

양동규 (梁東圭)

1984년 11월 4일생, 2010년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석·박사통합과정.

김영균 (金永均)

1987년 01월 07일생, 2010년 아주대 공대 신소재공학과 졸업, 현재 고려대 대학원 신소재공학과 석·박사통합과정.

이태성 (李太成)

1986년 9월 2일생, 2012년 대전대 전기공학과 졸업, 현재 연세대 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 09월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 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 신소재공학과 교수.