

초전도 나노선 단일광자 검출기

최지만
한국표준과학연구원 양자기술연구소

1. 서 론

지난 십여 년간 급격하게 발전하고 있는 양자기술로 인해 양자컴퓨터, 양자 암호 등 새로운 분야의 기술이 등장하고, 이러한 기술들로 인해 정보통신기술 분야의 패러다임이 바뀌는 중요한 시점이 다가오고 있다. 그 예로 양자기술의 특허 출원 수는 2010년부터 2019년까지[1], 10년 사이에 4배가 증가했으며, 양자기술 분야의 매출은 2030년까지 현재보다 6배 이상 성장하여 약 33억 달러에 도달할 것으로 예상되고 있다[2]. 양자기술은 크게 양자 컴퓨팅, 양자 센서, 그리고 양자 암호통신 등으로 나뉘며, 양자역학의 기본원리를 접목하여 연산 속도 및 암호의 기밀성, 초정밀 계측을 가능케 하는 혁신적인 기술이다. 양자기술의 세부 분야 가운데 상용화에 가장 근접한 기술은 양자 암호통신이다.

양자 암호 통신은 통신상의 보안을 수학적인 계산 복잡성이 아니라 자연의 기본원리인 양자역학의 법칙을 사용하는 보안 기술이다. 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 가장 대표적인 예로는 양자역학의 원리를 기반으로 키 분배 과정에서 도청의 위험성이 없는 양자 키 분배가 있다. 가장 대표적인 양자 키 분배 방법으로 BB84 프로토콜[3]이 있다. 이러한 양자 암호 시스템은 단일광자를 정보의 전송 수단으로 사용하기 때문에 검출기에 따라 시스템의 성능이 큰 영향을 받는다. 단일광자 검출기는 크게 진공관 기반과 반도체 기반, 초전도 기반으로 구분할 수 있으며, 이 중에서 초전도 기반의 초전도 나노선 단일광자 검출기(Superconducting nanowire single photon detector, SNSPD)는 압도적인 성능을 보이기 때문에 양자 암호 통신 외 양자 광학과 양자 컴퓨팅 분야에도 사용되고 있다.

본 기고는 양자기술의 핵심 부품으로 사용되고 있는 단일광자 검출기 가운데 가장 뛰어난

성능을 보여주고 있는 SNSPD에 대하여 소개하고자 한다. 다양한 방식이 적용된 단일광자 검출기에 대한 간략한 비교와 함께 SNSPD의 검출 원리 및 연구 동향에 관한 설명을 기술하고자 한다.

2. 단일광자 검출기 성능비교

단일광자 검출기 비교에 앞서서 단일광자 검출기들의 성능을 나타내는 대표적인 지표들에 대하여 설명하고자 한다. 검출기 성능지표의 대표적인 것은 암 계수율과 검출효율, 불감 시간, 최대 계수율, 지터, 에너지 및 광자 수 식별이 있으며, 각각의 지표들에 대하여 자세히 설명하자면 다음과 같다.

암 계수율(Dark count rate)은 단일광자 검출기의 초당 오작동 횟수를 나타낸다. 단일광자 검출기는 빛을 흡수하면 전기적인 펄스 신호를 방출한다. 하지만 때때로 빛을 흡수하지 않은 상태에서도 빛을 흡수했을 때와 동일한 전기적 신호를 방출하며 이를 암 계수라고 한다.

검출효율은 검출기가 단일광자를 검출할 수 있는 성능을 나타내며, 검출기에서 가장 중요한 지표 가운데 하나이다. 일반적으로 검출기는 암 계수율이라는 초당 오작동 확률을 갖고 있다. 이 오작동 때문에 생기는 펄스는 구별이 되지 않으므로, 검출기의 효율을 계산할 때는 아래와 같은 식을 적용한다.

$$\text{검출 효율}(\eta) = \frac{(\text{초당 펄스수} - \text{암 계수율})}{\text{초당 입사된 광자수}}$$

불감 시간(Dead time)은 검출기가 광자를 검출하고 초기화되는데 필요한 시간이며, 회복시간(recovery time)이라고 불린다. 이 시간 동안 광자가 입사되어도 검출기는 광자를 감지하지 못한다. 검출기가 초당 최대로 감지할 수 있는 광자의 수를 최대 계수율(Max count rate)이라고 하며 일반적으로

불감 시간의 역수로 생각할 수 있지만, 검출기의 한계로 인하여 최대 계수율은 불감 시간의 역수보다 낮을 수 있다.

지터(Jitter)는 신호 파형의 시간 측 상 불확도를 의미한다. 검출기는 광자를 흡수한 뒤 일정 지연시간이 흐른 뒤 전기신호를 방출하며, 이 지연시간 분포의 반치폭이 지터이다. 지터는 검출기의 검출 방법에 영향을 받으며 그 외에도 신호 대 잡음 비(Signal to noise ratio, SNR)에 영향을 받는다. 지터 값이 낮을수록 광자 검출의 시간 분해능이 높아져서, 더 정밀한 검출이 가능하다.

에너지 식별(Energy resolution)은 검출기에 입사된 물질의 에너지의 양을 탐지하는 능력이다. 대부분의 단일광자 검출기는 이러한 에너지 분해능이 없으며, TES(Transition edge sensor)와 초전도체 터널 접합 검출기 등이 이러한 능력을 갖추고 있다. 이러한 검출기들은 입사된 광자의 파장에 따라서 방출하는 펄스의 모양이 달라지며 이를 통하여, 입사된 광자의 에너지를 계산할 수 있다. 또한, 이러한 검출기들은 같은 파장의 광자가 동시에 여러 개가 흡수되었을 때, 입사된 광자의 수도 분리할 수 있다. 이러한 능력을 광자 수 식별능력(Number resolution)이라고 한다. 검출기는 입사되는 에너지양에 선형적인 펄스를 내놓으므로, 입사되는 광자의 수나 에너지 둘 중 하나를 고정한 상태에서만 분해 능력을 완벽하게 사용할 수 있다.

| | type | Wavelength (nm) | Efficiency (%) | DCR (#/s) | Jitter (ps) | Max count rate (#/s) | # resolution | Temperature (K) |
|---------|----------------------|-----------------|----------------|-----------|-------------|----------------------------------|--------------|-----------------|
| Visible | PMT ^[4] | 500 | 45 | 6000 | 300 | 10 ⁷ | 0 | 300 |
| | SPAD ^[5] | 800 | 80 | 300 | 400 | 10 ⁶ | X | 250 |
| | SNSPD ^[6] | 800 | 90 | 10 | 15 | 10 ⁷ | X | 2.5 |
| IR | PMT ^[7] | 1550 | 2 | 200k | 400 | 10 ⁷ | 0 | 230 |
| | SPAD ^[8] | 1550 | 25 | 150 | 200 | 10 ⁴ ~10 ⁶ | X | 200 |
| | SNSPD ^[9] | 1550 | 90 | 100 | 50 | 10 ⁶ | X | 2.2 |

표 1 가시광선과 근적외선 영역의 단일광자 검출기 성능지표 비교.

위에서 설명한 검출기 지표들을 이용하여 대표적인 검출기 3종의 특성을 표1에 나타내었으며 모두 상용제품의 수치를 표기했다. 가시광선 영역에서는 반도체 기반의 SPAD(Single photon avalanche diode)가 높은 효율과 작은 크기 및 편리한 사용법으로 매우

큰 장점이 있으며, 진공관 기반의 PMT(Photomultiplier tube) 또한 넓은 수광 영역 및 광자 수 분해 능력의 장점이 있다. 하지만 근적외선 파장 대역에서는 PMT와 SPAD는 효율이 매우 낮으며, SNSPD만 높은 검출효율을 보여준다. 표 1을 참고했을 때 적외선 영역 파장에서 높은 검출효율과 낮은 암 계수, 낮은 지터 값을 가진 SNSPD가 광섬유를 이용한 양자 암호통신에는 가장 적합한 검출기임을 알 수 있다.

3. 초전도 나노선 단일광자 검출기

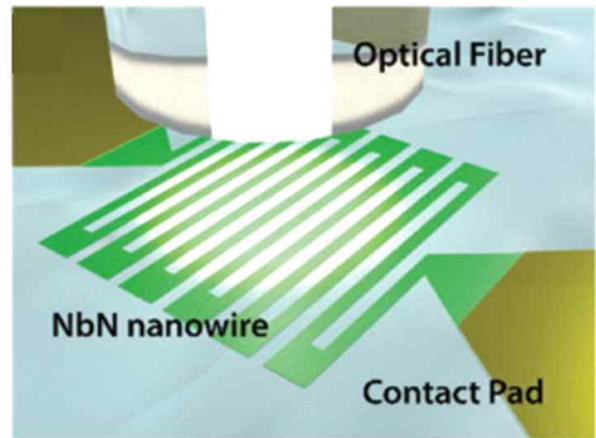


그림 1 광섬유 코어에서 발산하는 빛과 구불구불한 나노선 영역의 광 결합모식도[10].

SNSPD의 광자 검출 원리는 1996년 Rochester 대학교의 A. M. Kadin과 M. W. Johnson에 의해 매우 얇은 초전도체 박막이 광자의 에너지에 의해서 초전도 상태가 깨져 상전이 하는 아이디어에서 시작되었다 [11]. 2001년 A. D. Semenov는 수 nm의 두께와 수백 nm의 선폭을 가진 초전도 나노선에서 전류가 흐르는 경우 광자의 흡수로 전압 펄스가 생성된다는 내용을 발표하였으며 [12], 이를 바탕으로 같은 해 G. N. Goltsman는 SNSPD를 최초로 발명했다 [13]. 빛을 흡수하는 흡수체의 구조는 일반적으로 그림 1에 나타낸 것과 같이 구불구불한 형태를 취하며, 100 nm 내외의 선폭 크기를 갖고 있어서, 초전도 나노선 검출기라고 불리운다.

SNSPD의 나노선에 흡수된 광자의 에너지가 나노선의 초전도 상태를 깨트리려 상전이를

일으키고 이 현상을 측정하여 광자의 흡수 여부를 검출한다. 조금 더 자세히 설명하면, 초전도 나노선에 임계전류(switching current I_s)보다 낮은 전류를 가해주면 (I_b), 초전도 상태이므로 전압이 측정되지 않는다(그림 2 (a)). 이 상태가 초기 상태로 광자의 흡수를 기다리고 있는 동작 상태이다. 만약 나노선이 광자를 흡수한다면 광자의 에너지는 매우 작은 저항영역을 생성하게 되고 쿠퍼쌍이 깨지며 일반 전자들이 생성된다(그림 2 (b)).

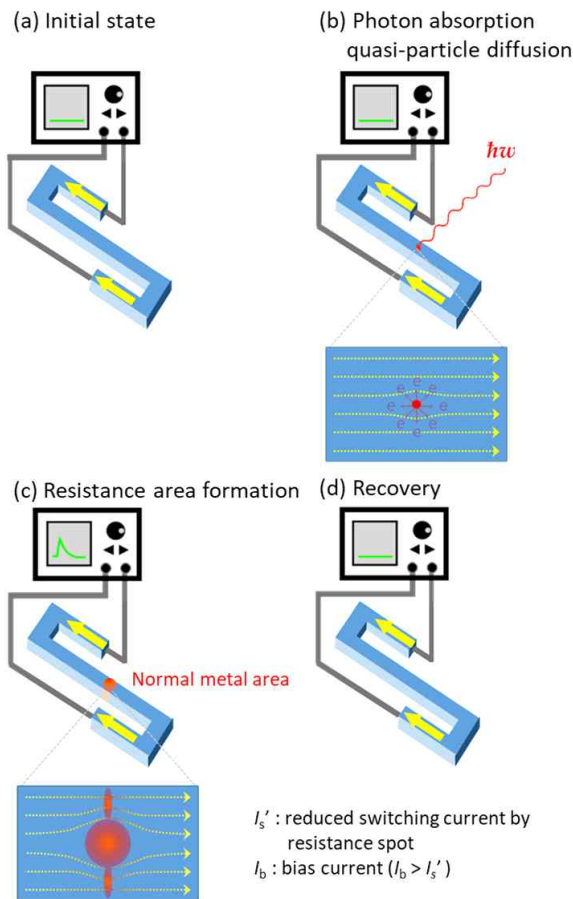


그림 2. SNSPD의 광자 검출 과정 모식도 (a) 준비상태, (b) 광자 흡수, (c) 저항영역형성 및 전기 펄스 방출 (d) 초기화 과정.

저항영역의 전자들은 주변부로 퍼져나가며 저항영역은 점점 넓어진다. 광자로 생긴 저항영역들은 초전도 나노선에서 쿠퍼 쌍이 흐를 수 있는 면적이 줄어들어 임계전류는 I_s 보다 낮은 I'_s 이 된다. 임계전류값이 동작 전류값보다 낮아지면 (I_b/I_s) 나노선은 초전도 상태를 잃어버리고 상전이를 하게 되어 저항이 발생하며, 광자가 흡수된 영역 주변에 나노선을

가로지르는 영역은 하나의 저항 띠를 형성하며 저항 띠를 교차하는 전류를 통해서 전압을 측정할 수 있게 된다(그림 2 (c)). 저항영역은 포논과 전자의 산란 효과로 인하여 냉각되며, 다시 초전도 상태가 되어 초기 상태로 돌아온다(그림 2 (d)). 이 과정에서 동작 전류에 의해서 소자는 저항의 생성 여부를 전압의 측정으로 확인할 수 있으며, 이 전압 신호는 펄스의 형태로 관측된다. 그림 2는 SNSPD의 광 흡수 과정의 각 단계를 모식도로 나타낸 것이다[13, 14, 15]. 위의 과정을 통해 생성된 전압 펄스를 RF 증폭기를 이용하여 증폭시킨 뒤 오실로스코프로 관찰하면 그림 3 (a)와 같은 형태의 지수적으로 감소하는 전압 펄스가 측정된다.

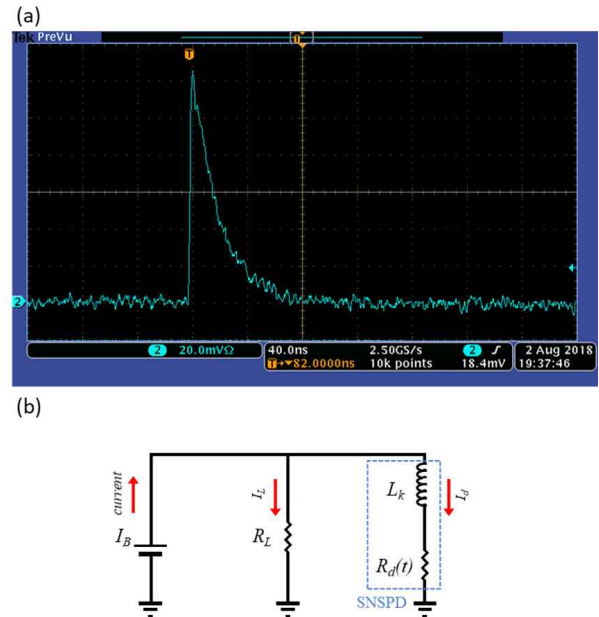


그림 3 (a)오실로스코프로 관측한 광자 흡수로 생성된 전압 펄스 (b) SNSPD의 등가회로 모식도.

펄스의 감쇠 시간은 초전도체 상전이 시간보다 소자의 구조에 더 큰 영향을 받는다. 이 지수 함수의 감소 항 τ_r 은 $\tau_r = L_k/R_L$ 의 식을 만족하며 L_k 는 광흡수체인 나노선의 단면적과 길이가 반영된 키네틱 인덕턴스(kinetic inductance)이며, R_L 은 부하저항 값이다. 그림 3 (b)는 SNSPD 등가회로 모식도이며, 보통 임피던스(Impedance)가 50 Ω 인 RF 케이블을 사용하므로 부하저항 값은 50 Ω 으로 간주할 수 있다. 하지만 L_k , R_L 값

은 소자 제작 및 측정장치 구성 시 변경 가능한 수치이므로, 두 변수의 값을 변경하여 펄스의 길이를 조절할 수 있다. 이 전압 펄스의 길이는 검출기의 불감 시간과 연관이 있으며, 펄스의 길이를 조절하여 더 짧은 불감 시간을 가지도록 구조를 변경할 수도 있다[16, 17].

4. 연구동향

초기 SNSPD를 연구하던 학자들은 고효율의 검출기를 개발하는 것을 최우선 목표로 설정하고 연구를 진행했다. 검출기의 효율은 나노선의 광 흡수율과 나노선의 양자효율의 곱으로 정의할 수 있으므로 두 요소 모두 100%에 근접하게 만드는 것이 고효율 검출기 개발에 필수적인 요소이다.

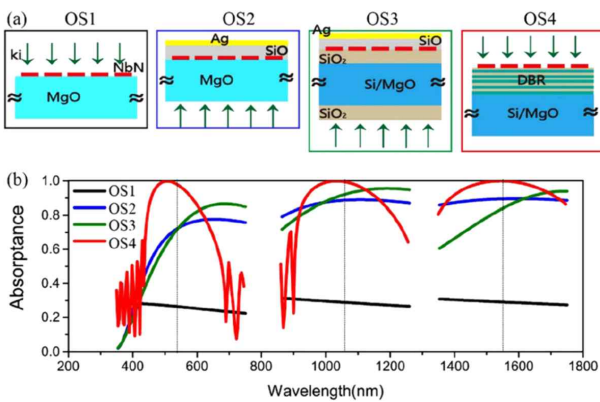


그림 4 (a) 광학적 구조별 SNSPD 단면 모식도, (b) 시뮬레이션으로 계산된 구조별 나노선의 광 흡수율[18]

일반적으로 사용하는 SNSPD는 광섬유와 결합하는 형태의 구조를 가지고 있다. 광섬유 끝단에서 빛은 가우시안 분포의 원 모양으로 방출되므로 흡수 면적을 늘리기 위해서는 그림 1과 같은 구불구불한 모양을 채택해야 하며, 그림 4 (a)의 OS1과 같은 형태를 보인다. 추가로 나노선의 흡수율을 증가시키기 위해서는 그림 4 (a) OS2~4와 같이 광학적 공진 구조가 필요하다. 광학적 구조의 두께와 굴절률을 조절하여 전기장의 분포 위치를 조정할 수 있으며, 나노선 주변에서 전기장이 가장 강하게 공진할 때 나노선의 흡수율은 최대가 된다. 그림 4 (b)의 흡수율 시뮬레이션 결과에 따르면 광학적 구조가 있는 OS2~4

의 흡수율이 광학적 구조가 없는 OS1에 비하여 매우 높다는 것을 알 수 있다.

SNSPD 개발 초기 검출효율은 나노선의 낮은 양자효율로 인해 고효율의 검출기를 제작하지 못했다. 기존의 초전도체 물질로 사용되던 NbN 대신 NIST의 연구진은 비정질 전이 금속 실리콘 합금을 사용하여 양자효율 100%에 도달한 결과를 발표했으며[19], 이를 바탕으로 93%의 검출효율을 보이는 SNSPD를 제작했다[20]. 하지만 0.12 K에서 동작하는 SNSPD를 냉각시켜줄 냉동기의 제작 비용 등의 문제가 있었다. 연구자들은 저비용 냉동기 시스템인 CCR(closed cycle refrigerator)의 동작 온도로 알려진 2.5 K에서 작동하는 SNSPD를 만들기 위하여 박막 연구를 더 진행하였으며, 증착 기술의 최적화를 통하여 2.5 K에서 100%의 양자효율을 달성할 수 있는 박막 및 소자 제작 기술을 확보했다. 이러한 연구 성과들을 이용하여 제작된 고성능의 SNSPD는 냉동기를 결합한 시스템으로 상용화에 성공했으며, 양자 암호 통신 및 양자 광학 실험에 활용되고 있다.

SNSPD는 광섬유 외에도 광 집적회로와 결합이 용이하다는 점을 이용하여, 실리콘 광도파관을 사용한 선형 광학 양자 컴퓨팅 회로 연구에 활용되고 있다. 다양한 분야로의 적용을 위해서는 검출기의 구조 및 성능을 맞춤형으로 제작해야 하기 때문에 다양한 형태로 SNSPD의 연구 개발이 진행되고 있다.

5. 맺은말

지금까지 단일광자 검출기 가운데 가장 뛰어난 성능을 보여주고 있는 초전도 나노선 단일광자 검출기에 관해 설명하였다.

초전도 나노선 단일광자 검출기는 양자 암호 통신 및 양자 광학, 양자 컴퓨터 등의 분야에서 활용도가 높은 검출기이다. 광섬유결합 방식의 SNSPD는 상용화에 성공하였을 정도로 기술적 성숙도가 높은 영역이지만, 여러 연구 분야에서는 다양한 형태의 SNSPD에 대한 수요가 존재하고, 이는 점차 증가하고 있다. SNSPD는 수요처에 적합한 맞춤형 설계를 필요로 하기 때문에, 앞으로도 양자기술의 발전을 위해서는 수요 지향적인 연구가 지속적으로 필

요하다.

참고문헌

- [1] 특허청, “양자정보기술의 시대가 오고 있다”.
(2 0 2 1)
<https://www.kipo.go.kr/ko/kpoBultnDetail.do?menuCd=SCD0200618&parntMenuCd2=SCD0200052&aprchId=BU T0000029&pgmSeq=18842&ntatcSeq=18842>
- [2] Yole Développement Press. “Quantum technologies 2020-2030 market forecast” (2021)
- [3] C. H. Bennett and G. Brassard. “Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing”. In Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, volume 175, page 8. New York (1984)
- [4]https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/H10770_TPMO1101E.pdf
- [5]https://marketing.idquantique.com/action/attachment/11868/f-0238/1/-/-/-/-/ID120_Brochure.pdf
- [6]<https://singlequantum.com/wp-content/uploads/2019/05/Single-Quantum-Eos.pdf>
- [7]https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/H10330C-25_-45_-75_TPMO1056E.pdf
- [8]https://marketing.idquantique.com/action/attachment/11868/f-0234/1/-/-/-/-/ID230_Brochure.pdf
- [9]https://www.scontel.ru/wp-content/uploads/2021/07/SSPD_versions.pdf
- [10] Ferrari, S., Schuck, C., & Pernice, W, “Review article Waveguide-integrated superconducting nanowire single-photon detectors”, *Nanophotonics* 7(11), 1725 - 1758 (2018).
- [11] A. M. Kadin, M. W. Johnson, “Nonequilibrium photon induced hotspot: A new mechanism for photodetection in ultrathin metallic films”, *Appl. Phys. Lett.* 69, 3938 (1996).
- [12] Alex D. Semenov, Gregory N. Goltsman, Alexander A. Korneev, “Quantum detection by current carrying superconducting film”, *Physica C* 351 349-356 (2001)
- [13] Goltsman G. N. et al, “Picosecond superconducting single-photon optical detector”, *Appl. Phys. Lett.* 79, 705 (2001).
- [14] VerevkinA, Zhang J et al, “Detection efficiency of large-active-area NbN single-photon superconducting detectors in the ultraviolet to near-infrared range” *Apl. Phys. Lett.* 80, 4687 (2002).
- [15] Yang J K W et al, “Modeling the electrical and thermal response of superconducting nanowire single-photon detectors” *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 581 - 5 (2007).
- [16] Kerman, A. J et al, “Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters” *Apl. Phys. Lett.* 88, 111116 (2006).
- [17] Kerman, A. J., Rosenberg, D., Molnar, R. J., & Dauler, E. A, “Readout of superconducting nanowire single-photon detectors at high count rates” *J. Appl. Phys.* 113, 144511 (2013).
- [18] Lixing You, “Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information”, *Nanophotonics* 9(9), 2673-2692 (2020).
- [19] Burm Baek, Adriana E. Lita, Varun Verma, and Sae Woo Nam, “Superconducting a-WxSi1-x nanowire single-photon detector with saturated internal quantum efficiency from visible to 1850 nm”, *Appl. Phys. Lett.* 98, 251105 (2011)
- [20] Marsili, F. et al, “Detecting single infrared photons with 93% system efficiency” *Nat. Photonics* 7(3), 210 - 214 (2013).

저자이력



최지만

2005-2011년 동국대학교 물리학과 학사, 2012-2014년 동국대학교 물리학과 석사, 2016-2021년 과학기술연합대학원대학교 측정과학과 박사, 현재 표준과학연구원 양자기술연구소 박사후연구원