

과제 번호 : 2023-2

## 보안 기반 유선 양자 암호통신을 위한 반도체 양자점-광섬유 결합 연구

- CsPbBr<sub>3</sub> 양자점-광섬유 결합 및 free form 중간 소자 설계를 통한 결합 최적화 -

김현재, 남정현, 박상현, 이경주, 임재성, 최승규

지도교수 : 조용훈 교수님

연구멘토 : 김대식, 김병수

멘토교수 : 민승식 교수님



**Quantum & Nanobio  
Photonics Laboratory**

# 목차

## 0. 연구 배경

## 1. 이론적 배경

(2023.08.14.)

## 2. 연구 방법

- ❖ 연구 목표
- ❖ 단일 양자점 공정 조건 확립
- ❖ 양자점-광섬유 결합
- ❖ 집광-효율적 결합을 위한 중간 소자 설계

## 3. 연구 결과

- ❖ 양자점 발광 스펙트럼 측정
- ❖ 양자점-광섬유 결합
- ❖ 중간 소자 설계 결과

## 4. 결론

## 5. 후속 연구 제시 및 연구 의의



# 0. 연구 배경

## ❖ 연구 배경 및 활용성

### • 1. 연구 배경

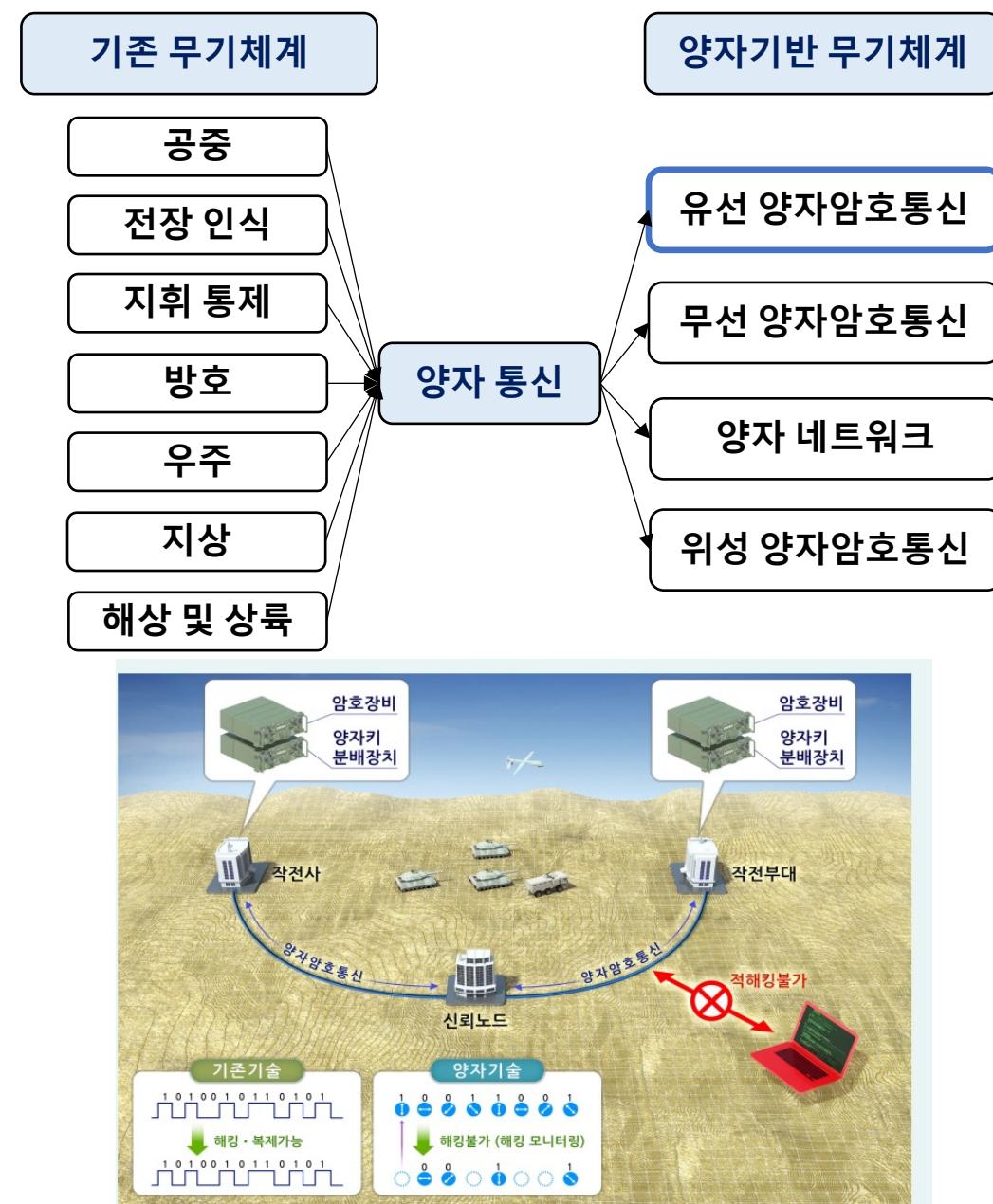
- 신뢰성을 의심받는 RSA<sup>Rivest, Shamir, Adleman</sup> 암호 체계 :  
**QKD (양자 키 분배)** 활용한 양자 암호통신의 필요성 대두  
Quantum Key Distribution

### • 2. 선제 조건

- 일반적인 광원이 아닌 양자물리학적 광원 :  
**페로브스카이트 CsPbBr<sub>3</sub>** 양자점
- 양자 광원을 전송하는 채널 :  
**광섬유**<sup>single mode</sup> 를 채널로 하는 유선 양자 암호통신

### • 3. 활용성

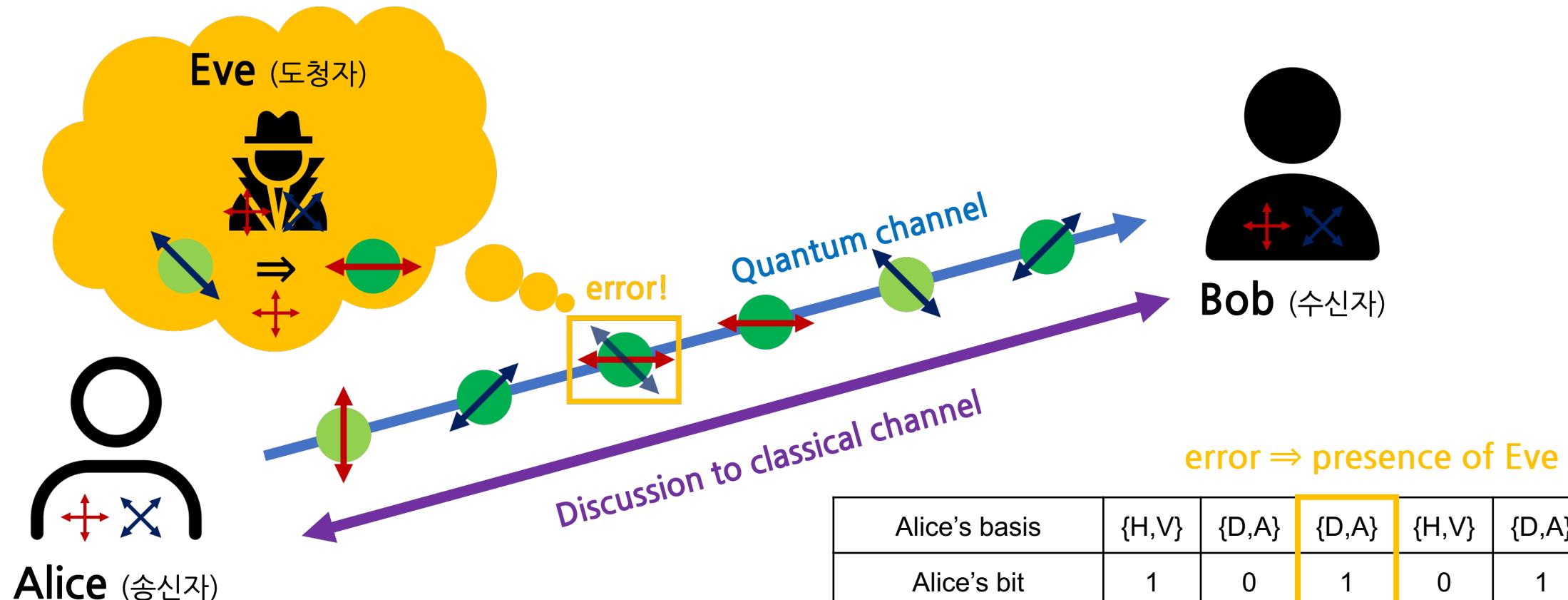
- 국방 통신망 이용
- 정보 보안이 요구되는 모든 분야에 접목 가능



국방기술진흥연구소(2022), 미래 전장양상을 바꾸는 국방 양자 기술 10선

# 1. 이론적 배경

❖ 양자 키 분배(Quantum key distribution, QKD) : BB84 protocol



Alice's basis	{H,V}	{D,A}	{D,A}	{H,V}	{D,A}	{D,A}
Alice's bit	1	0	1	0	1	0
Bob's basis	{H,V}	{D,A}	{D,A}	{D,A}	{H,V}	{D,A}
Bob's measurement	1	0	0	1	1	0
Shared key	1	0				0

# 1. 이론적 배경

## ❖ 단일 광자

- Second-order correlation function

- 고전 전자기 이론

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t + \tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t + \tau) \rangle}$$

$I(t) = |\varepsilon^*(t)\varepsilon(t)|$  (빛의 세기)

- 양자 광학 이론

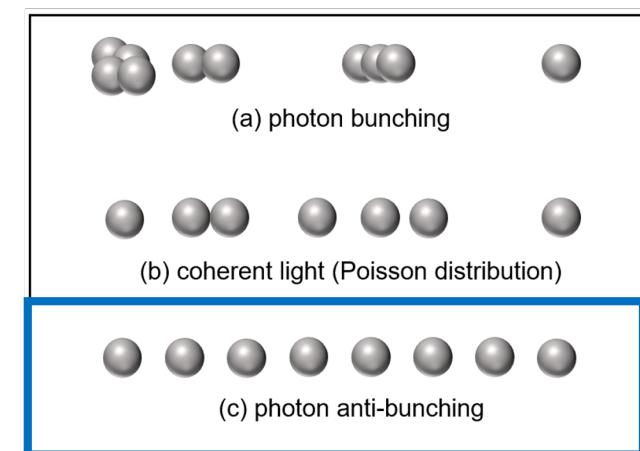
$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{a}^\dagger(t + \tau)\hat{a}^\dagger(t)\hat{a}(t + \tau)\hat{a}(t) \rangle}{|\langle \hat{a}(t)\hat{a}^\dagger(t + \tau) \rangle|^2}$$

$$\hat{a}^\dagger|n\rangle = (n + 1)^{\frac{1}{2}}|n + 1\rangle$$
 (올림 연산자)

$$\hat{a}|n\rangle = n^{1/2}|n - 1\rangle$$
 (소멸 연산자)

- $g^{(2)}(0)$ 에 따른 빛의 분류

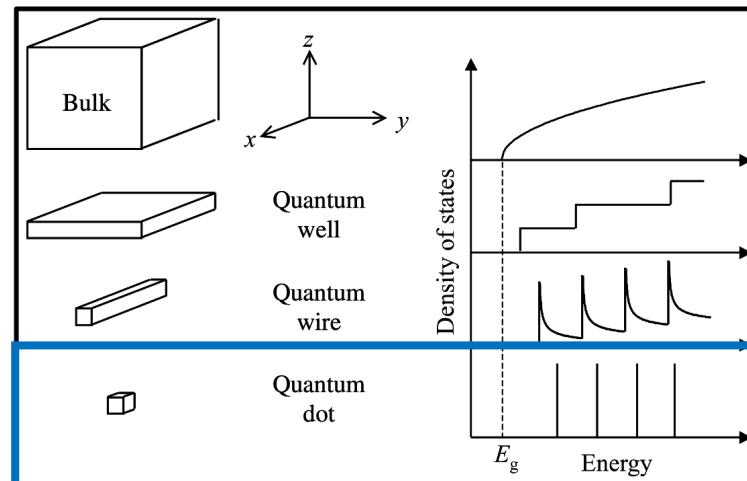
	$g^{(2)}(0)$	Photon stream	특성
Bunched light	$g^{(2)}(0) > 1$	Bunched	고전 광원
Coherent light	$g^{(2)}(0) = 1$	Randomly	
Anti-bunched light	$g^{(2)}(0) < 1$ (ideal, $g^{(2)}(0) = 0$ )	Antibunched	양자 광원



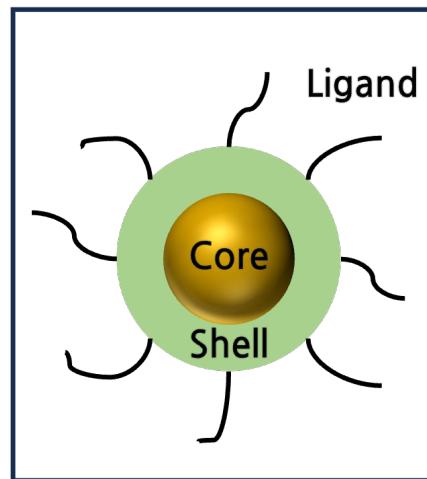
# 1. 이론적 배경

## ❖ 단일 광자 광원

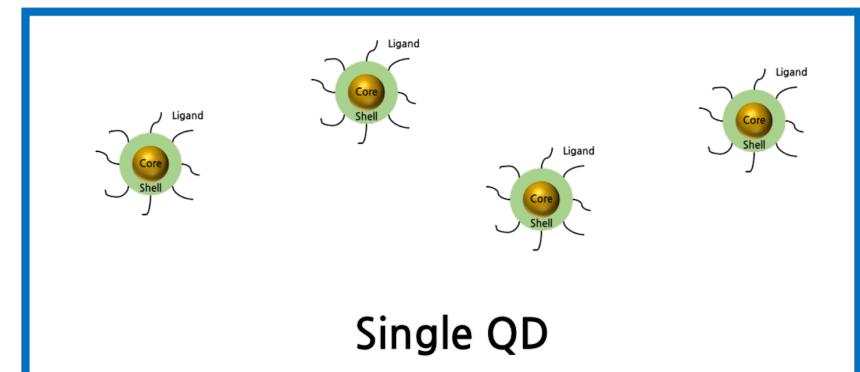
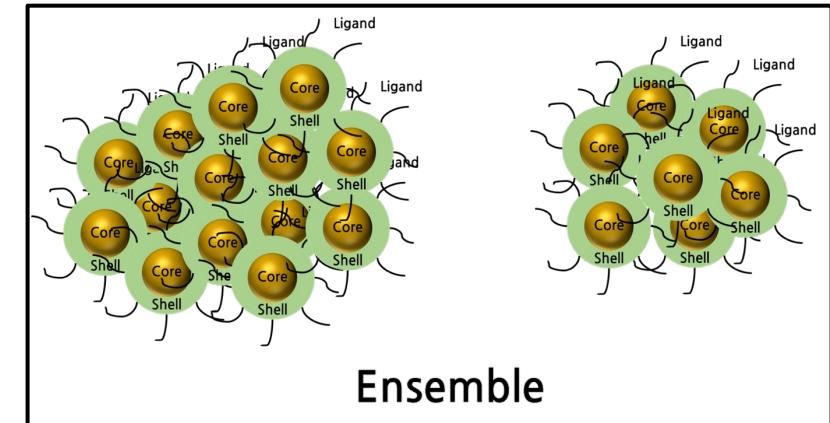
- CsPbBr<sub>3</sub> 페로브스카이트 양자점



Fox, A. M., & Fox, M. (2006). *Quantum optics: an introduction*



콜로이드 상태  
(Toluene 분산체)



Single QD

- 상온에서 양자 광원으로 적용 가능

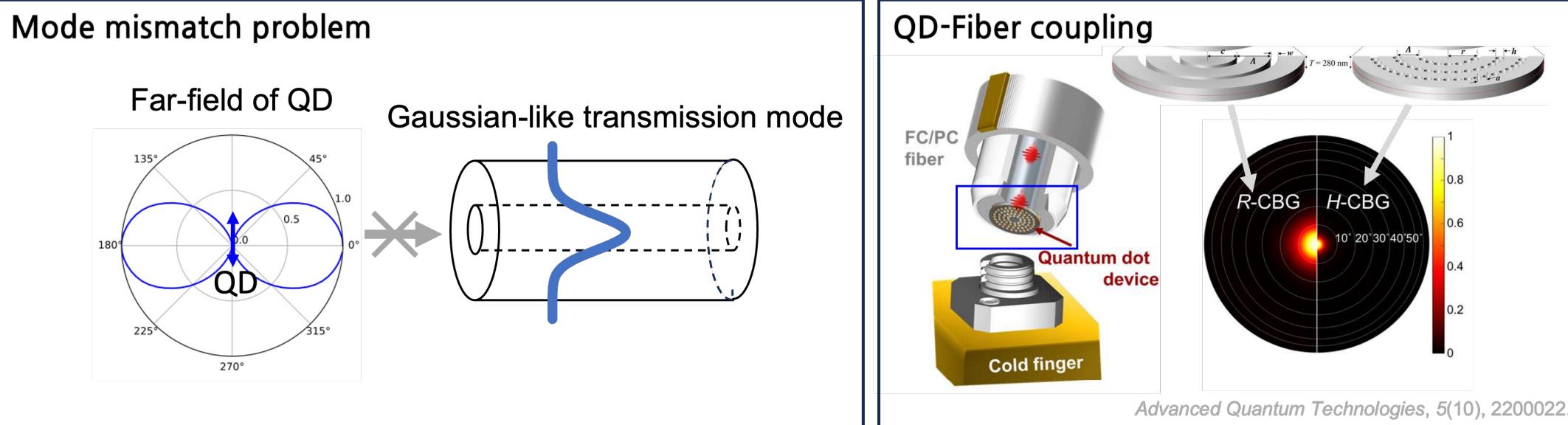
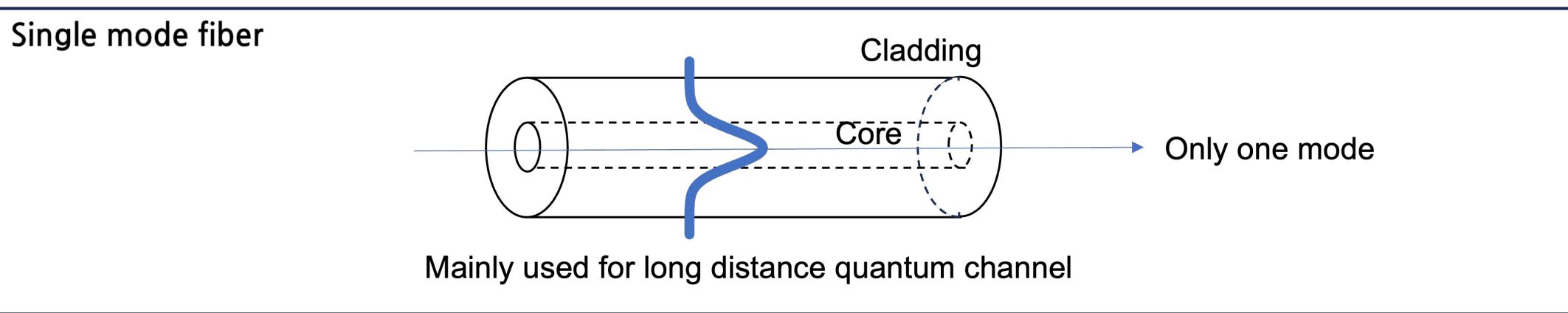
ACS Nano. 2015, 9, 10, 10386-10393

- 우수한 양자 효율(PL QY~100%)

Chem. Mater. 2017, 29, 18, 7663-7667

# 1. 이론적 배경

## ❖ 양자점-광섬유 결합(QD-Fiber coupling)

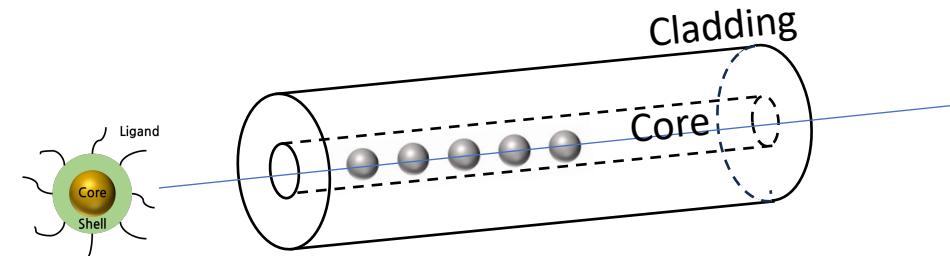


## 2. 연구 방법

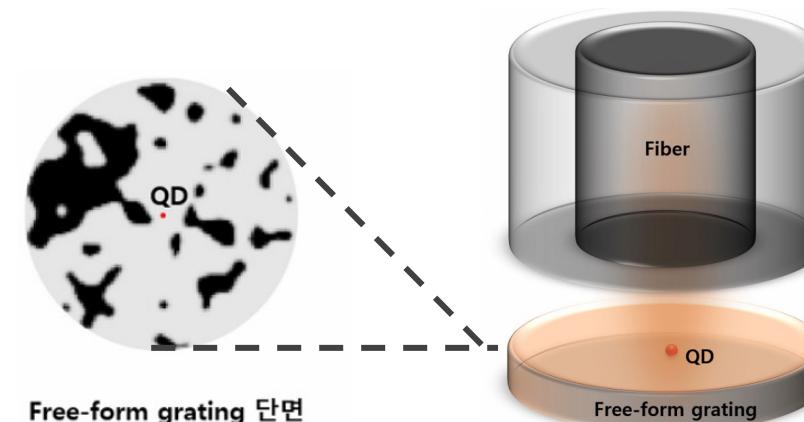
### ❖ CsPbBr<sub>3</sub> 기반의 유선 양자 암호 통신을 위한 양자점-광섬유 결합 연구

#### 세부 연구 목표

- CsPbBr<sub>3</sub> 단일 양자점을 얹는 공정 조건을 확립하고 양자점-광섬유 결합을 구현한다.



- 양자점-광섬유 결합에서 집광 효율을 상승시킬 수 있는 중간 소자를 설계한다.

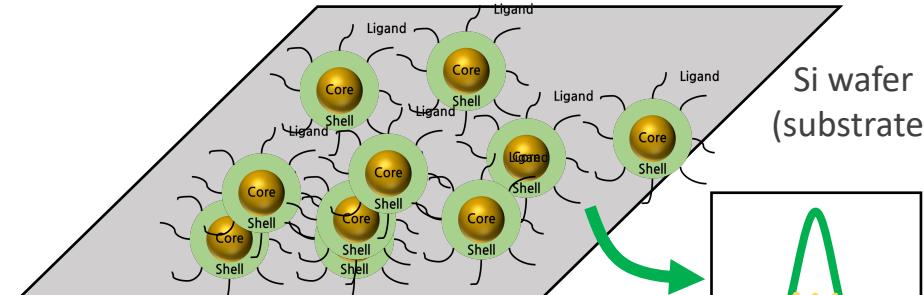


## 2. 연구 방법

### ❖ 단일 양자점 공정 조건 확립

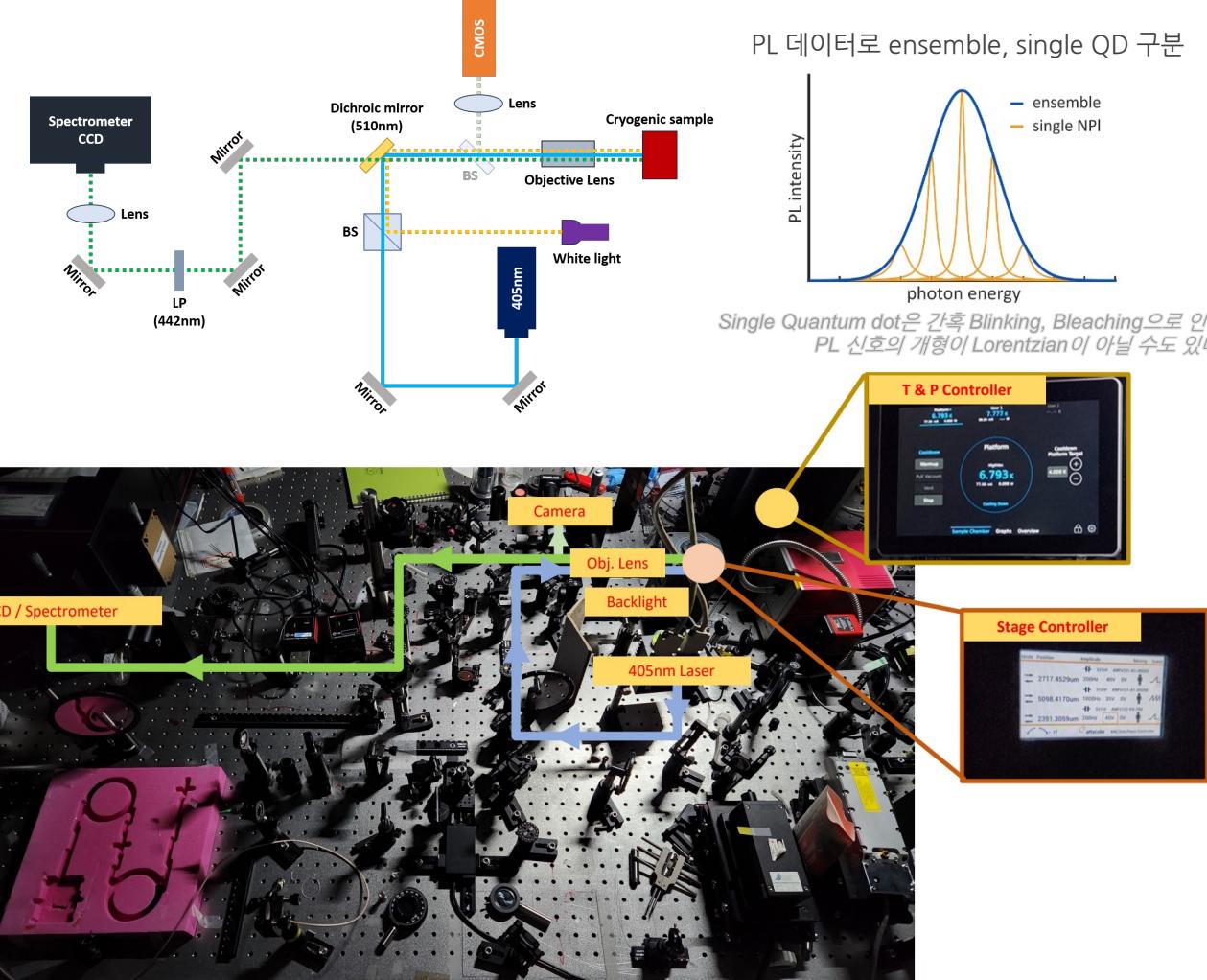
#### Spin coating 전처리 조건 변화

희석도(Dilution factor, DF) 높여가며 기판 위 양자점의 (면적)밀도 낮춤



큰 DF에서 단일 양자점 얻을 수 있을 것으로 기대.

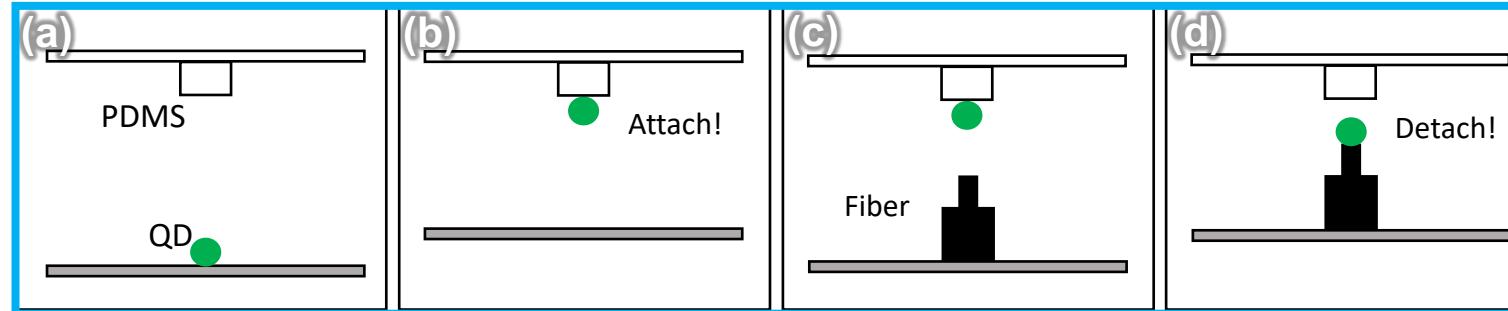
#### 저온(4 K) Micro-PL(Photoluminescence) 측정



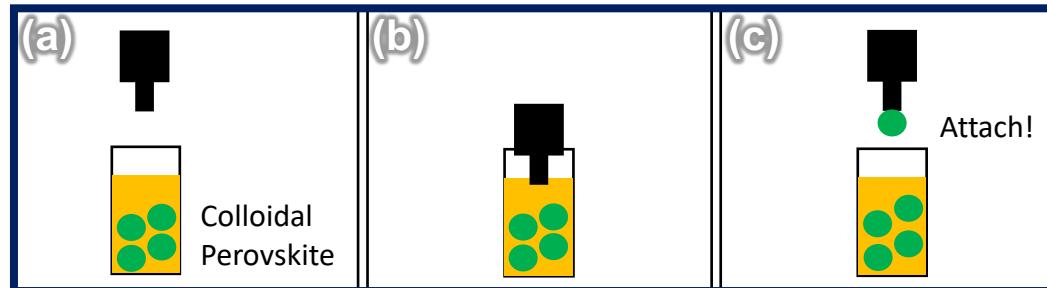
## 2. 연구 방법

### ❖ 양자점-광섬유 결합

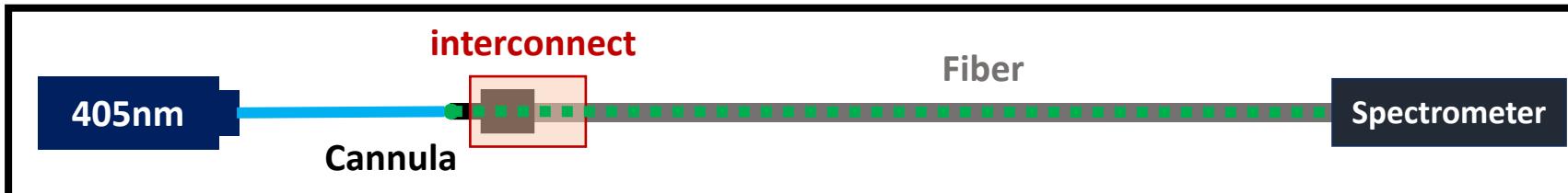
- Transfer1 과정



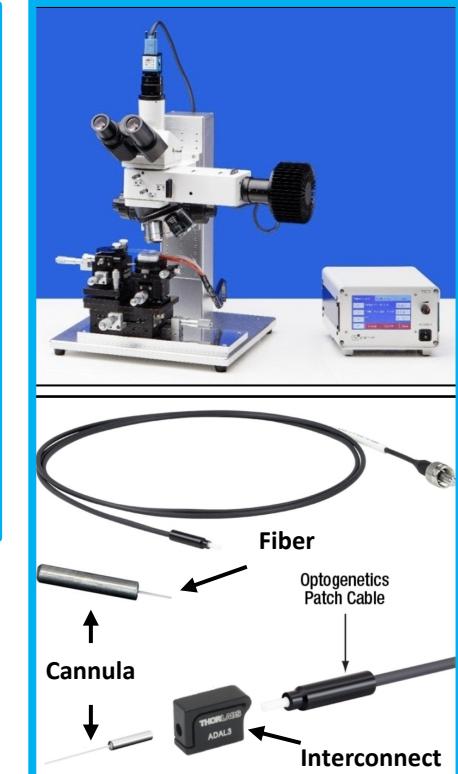
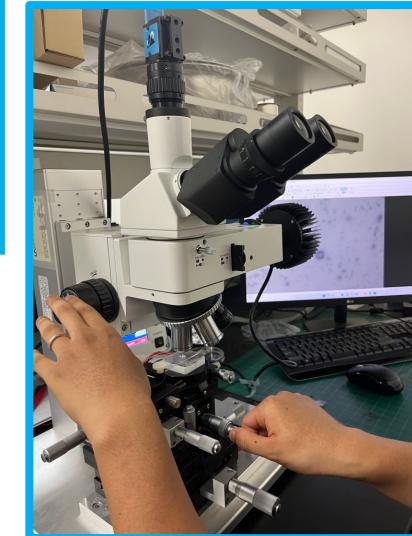
- Transfer2 과정



- PL 측정 셋업 (양자점-광섬유 결합 확인)

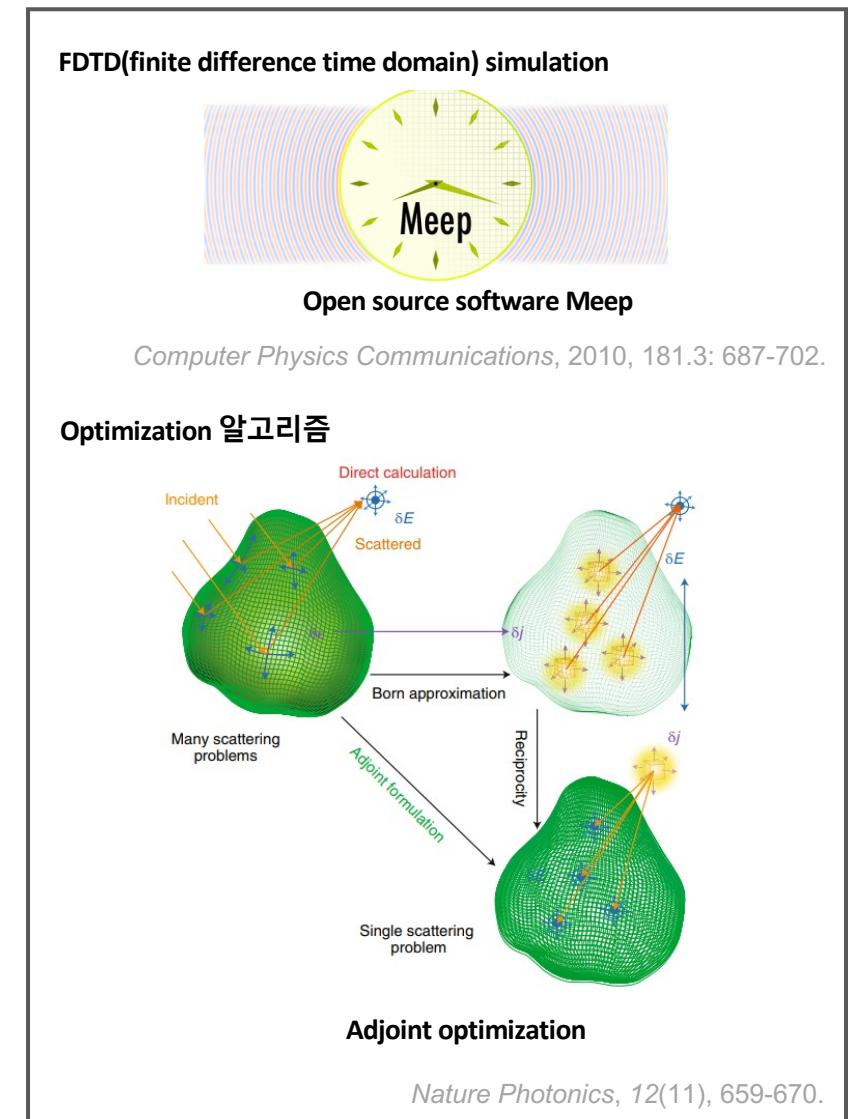
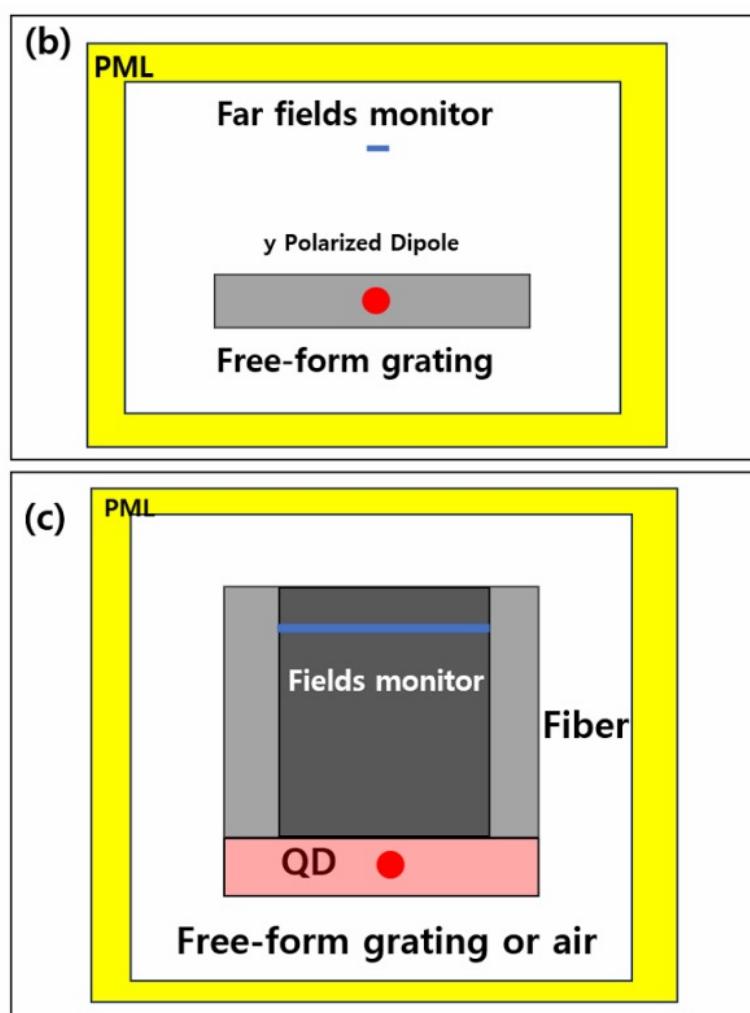
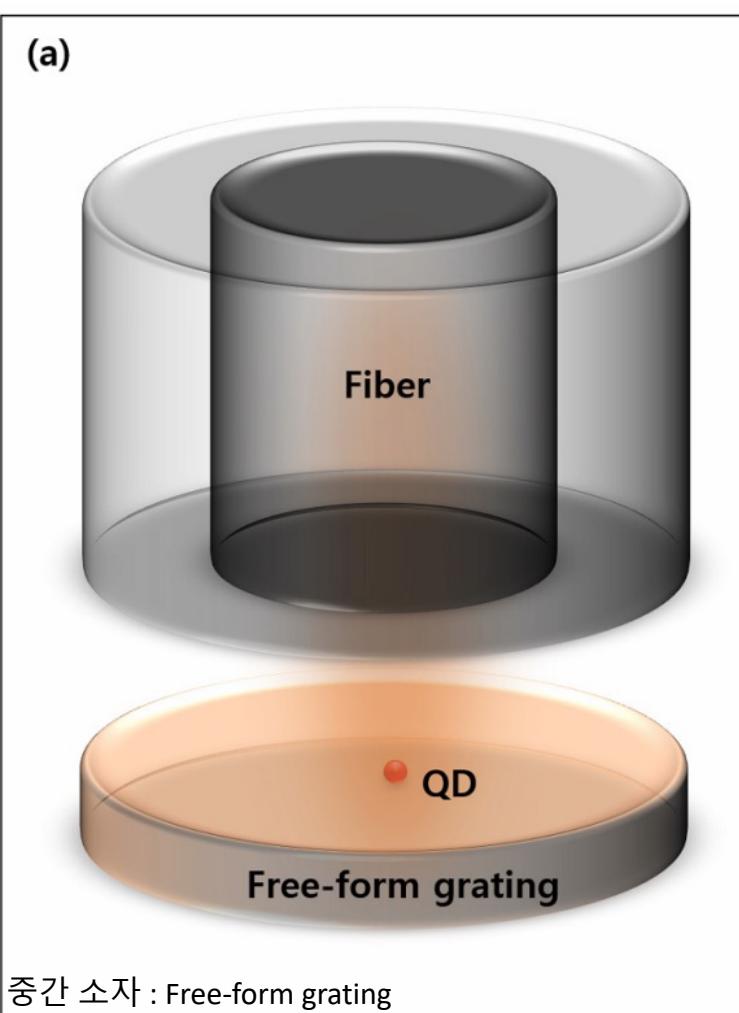


- Transfer 셋업



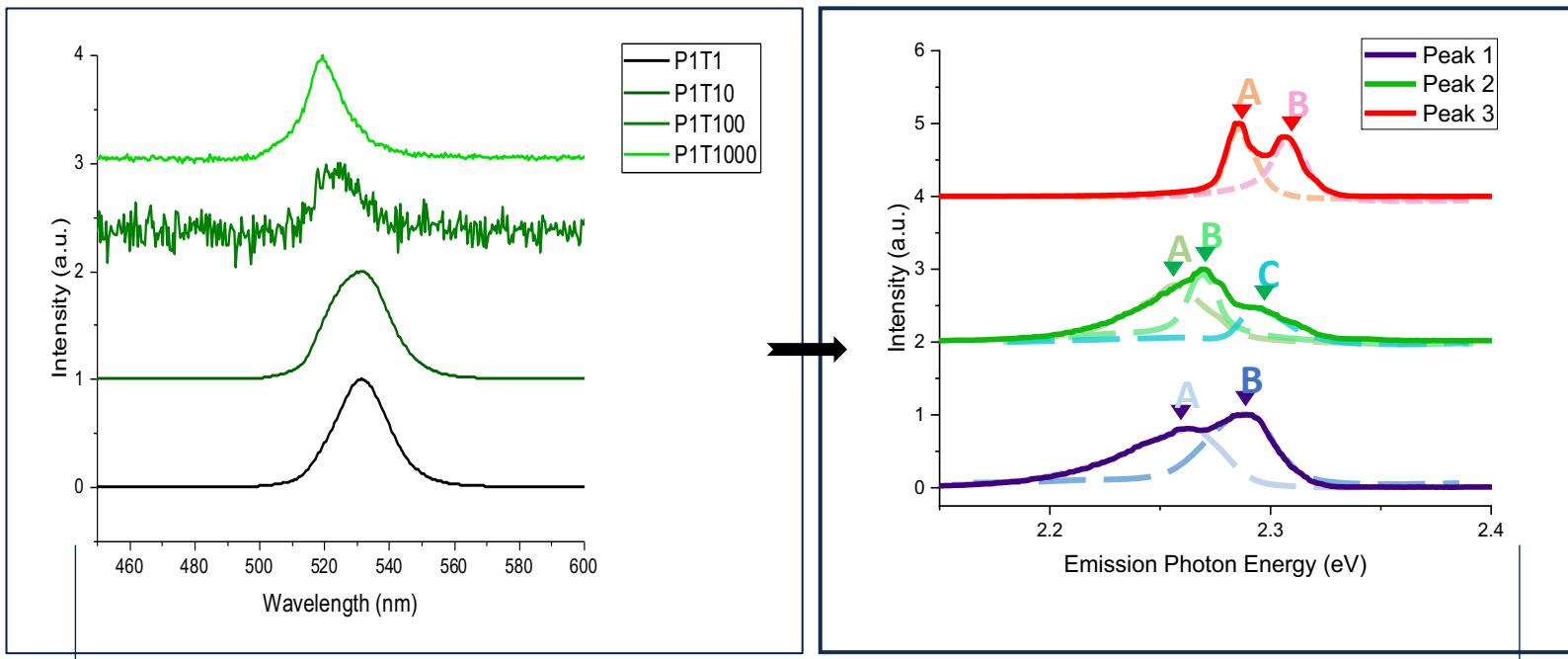
## 2. 연구 방법

### ❖ 집광-효율적 결합을 위한 중간 소자 설계



### 3. 연구 결과

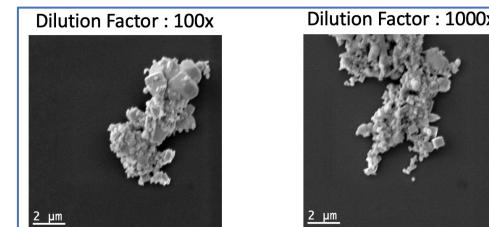
#### ❖ 양자점 발광 스펙트럼 측정



▲상온 micro-PL 측정 결과 스펙트럼

▲저온(~4 K) micro-PL 측정 결과 스펙트럼

Si 기판 위 낮은 면적 밀도임에도 양자점 **양상불**의 발광 확인



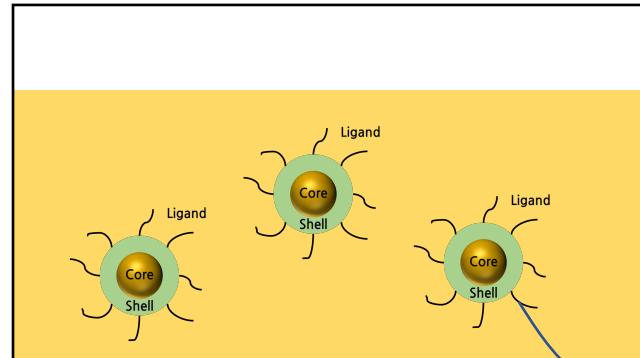
: 희석도를 높임에도 양자점의 응집이 계속되는 문제 발견

### 3. 연구 결과

#### ❖ 리간드 변경 : 단일 양자점 발광 스펙트럼 획득

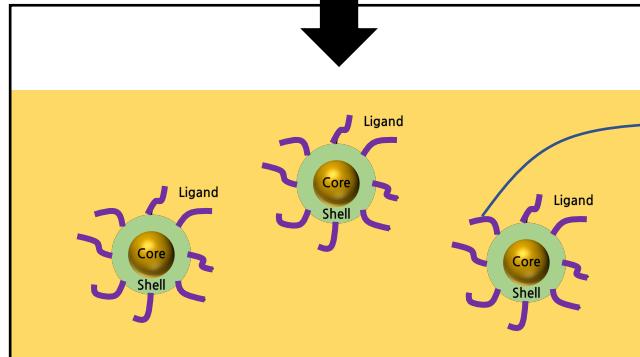
##### CsPbBr<sub>3</sub> 양자점 리간드 변경

리간드 변경: OA/Oam(기존) → Zwitterionic : Lecithin



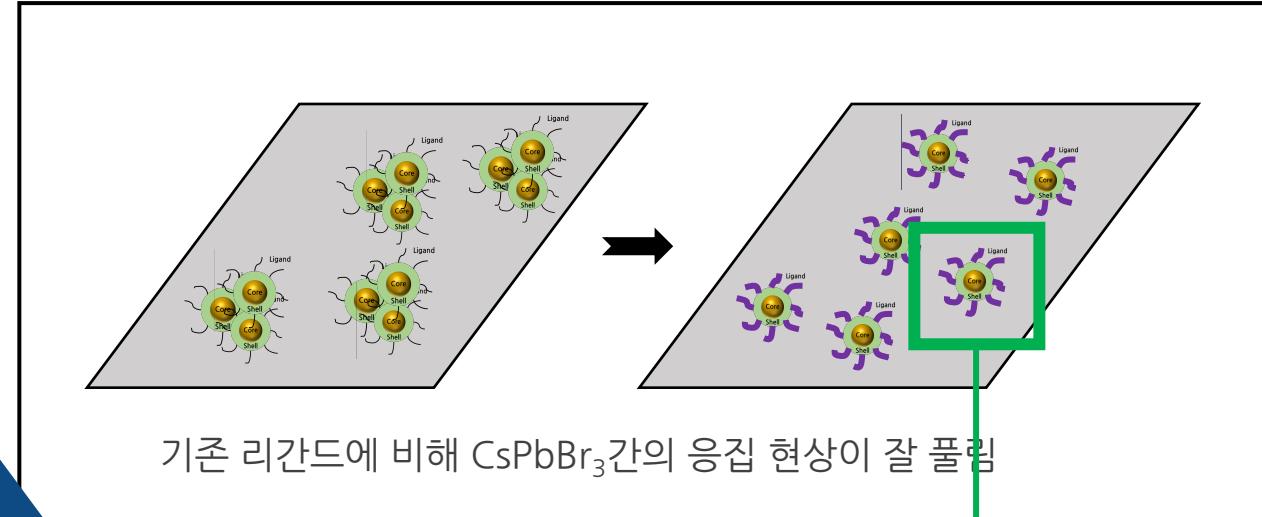
CsPbBr<sub>3</sub>  
용액

기존: OA/OAm

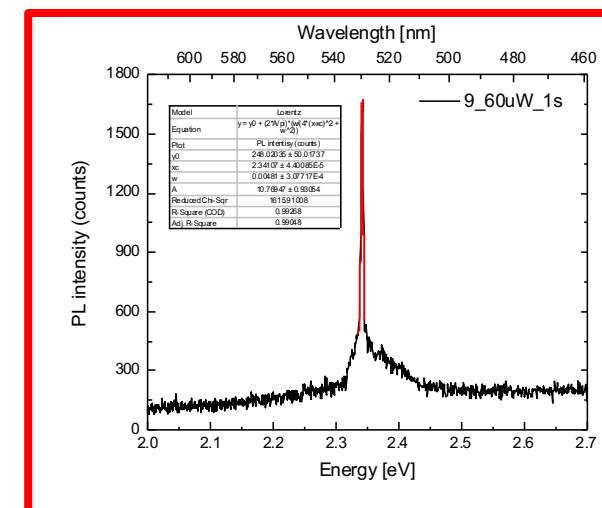


변경: Lecithin

⇒ 단일 양자점 제조에 유리하도록 분산이 잘 되는 리간드를 이용함.



기존 리간드에 비해 CsPbBr<sub>3</sub>간의 응집 현상이 잘 풀림



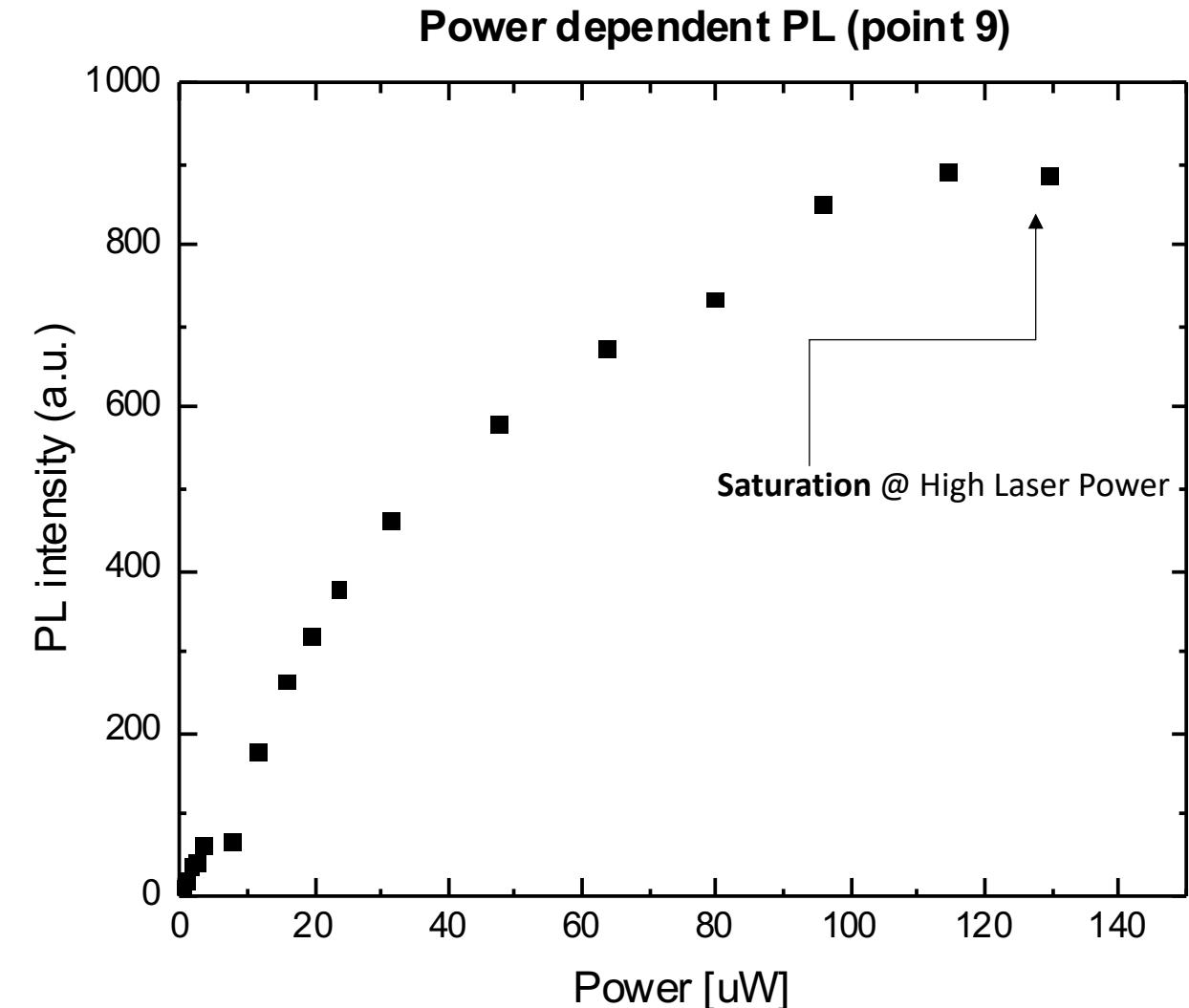
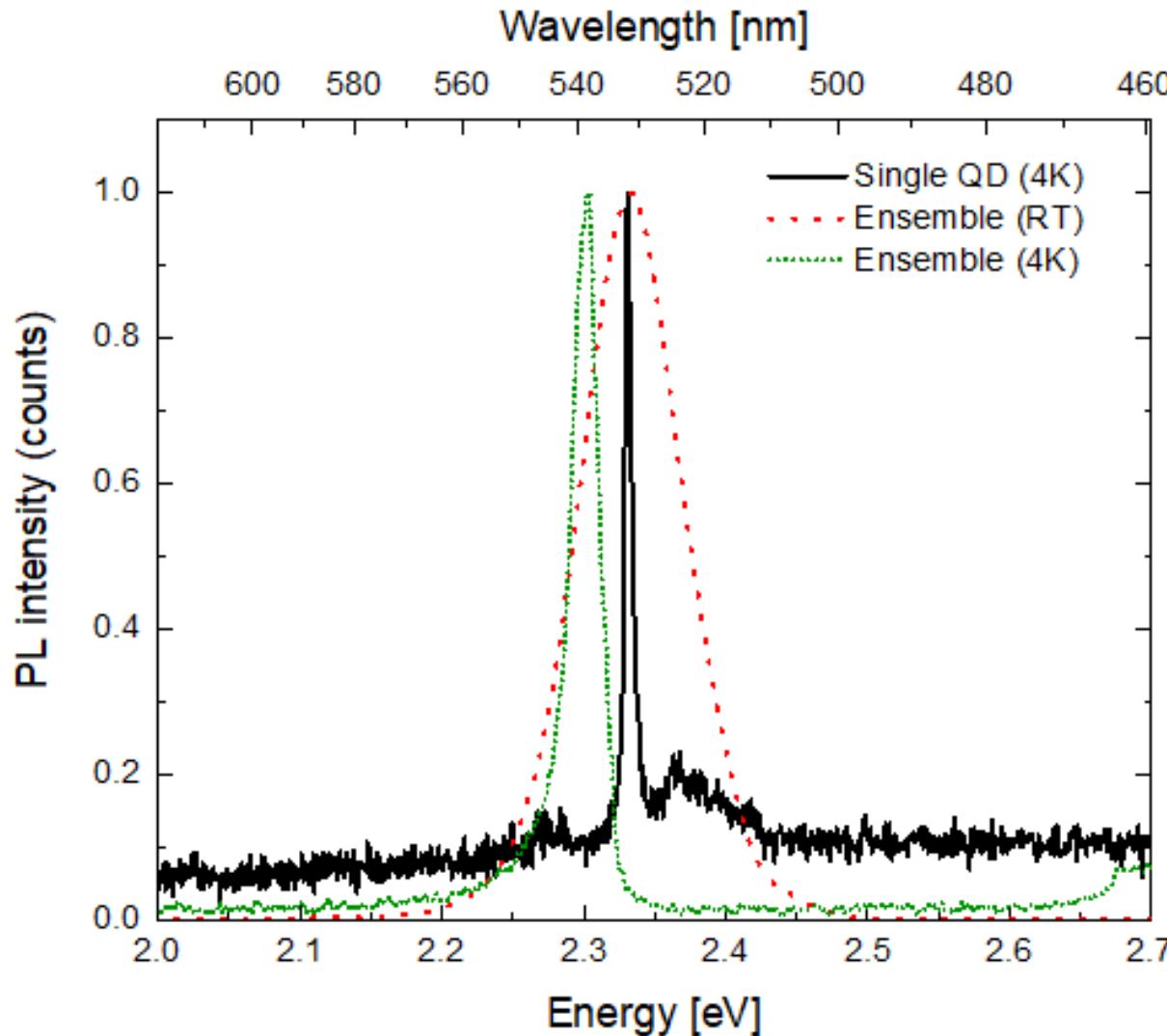
Spectrum 측정

단일 양자점  
획득 성공!

(2023.11.11 data)

### 3. 연구 결과

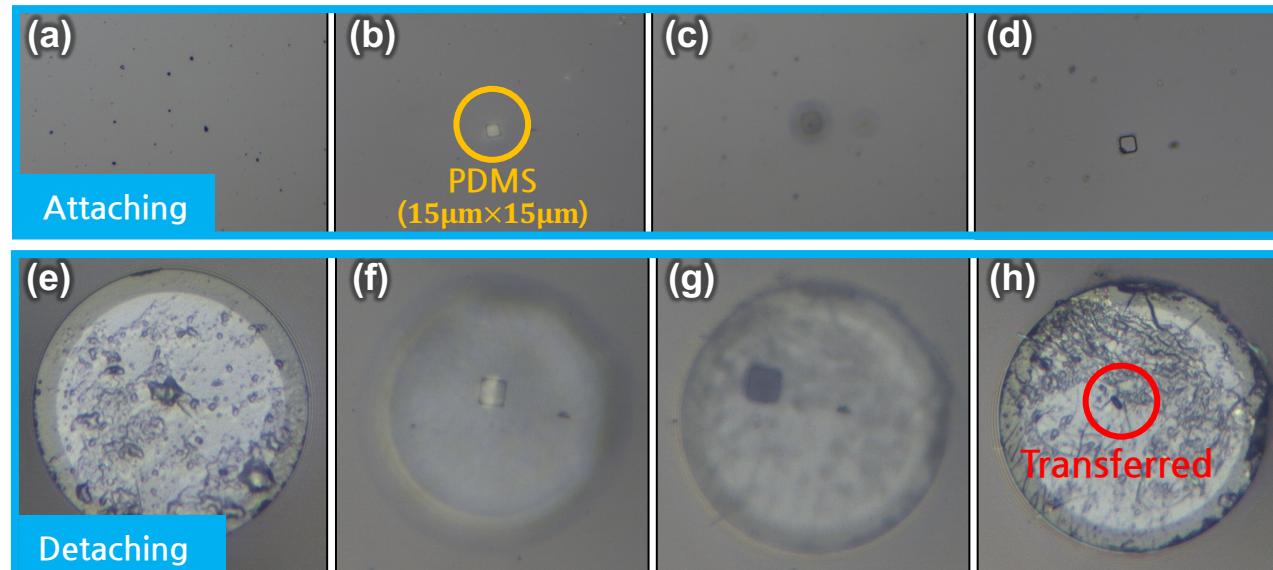
#### ❖ CsPbBr<sub>3</sub> 단일 양자점



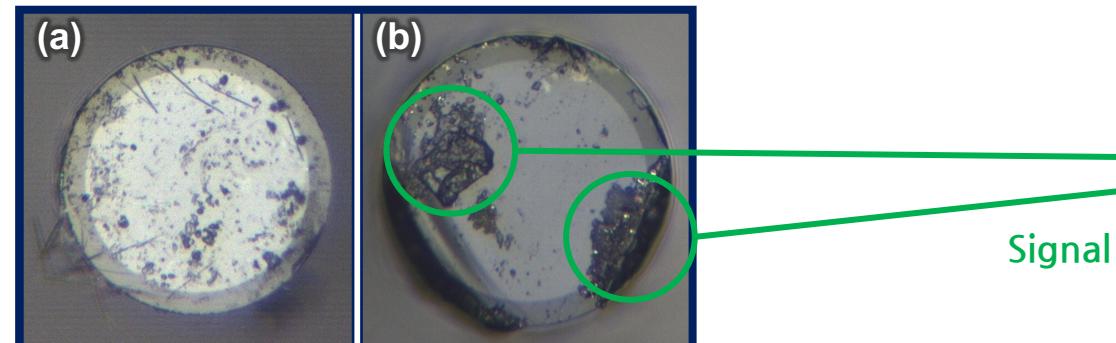
### 3. 연구 결과

#### ❖ 양자점-광섬유 결합

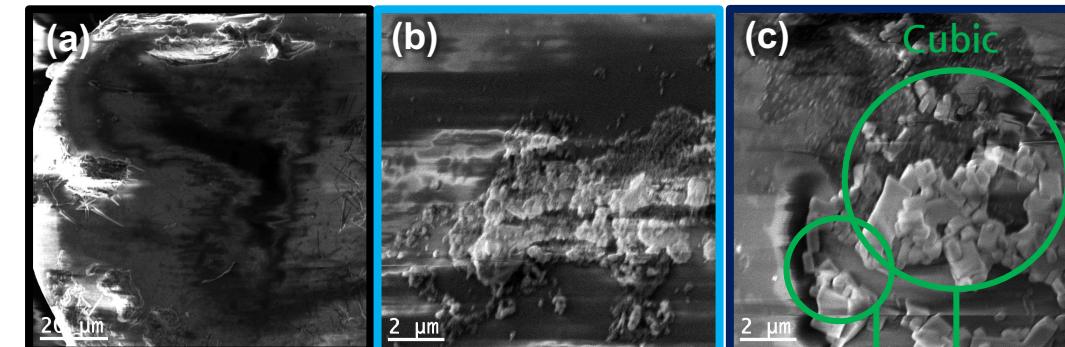
- Transfer1 과정을 통한 양자점-광섬유 결합(OM images, x40)



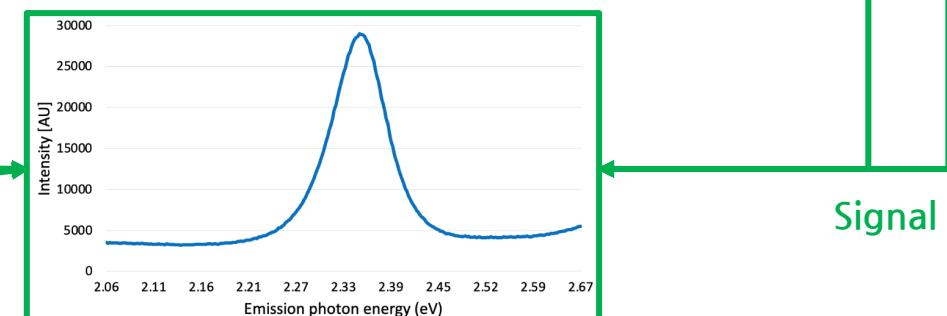
- Transfer2 과정을 통한 양자점-광섬유 결합(OM images, x40)



- SEM 촬영을 통한 Transfer 전후 표면 비교

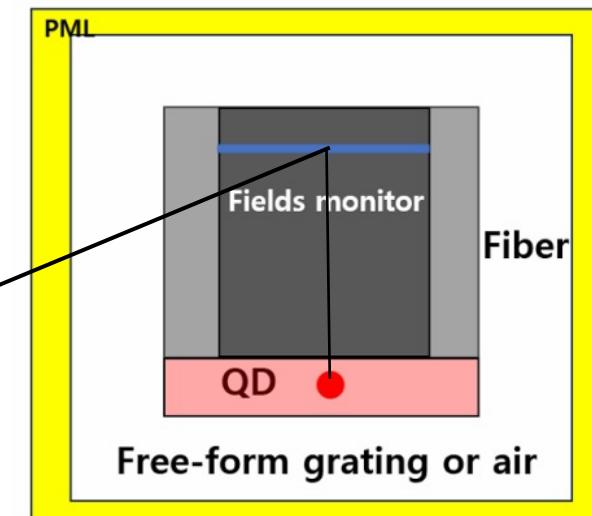
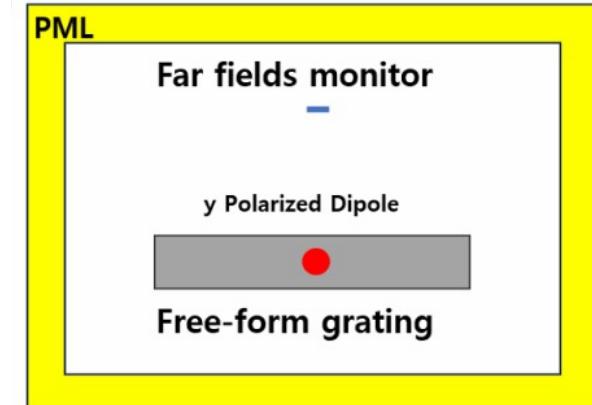
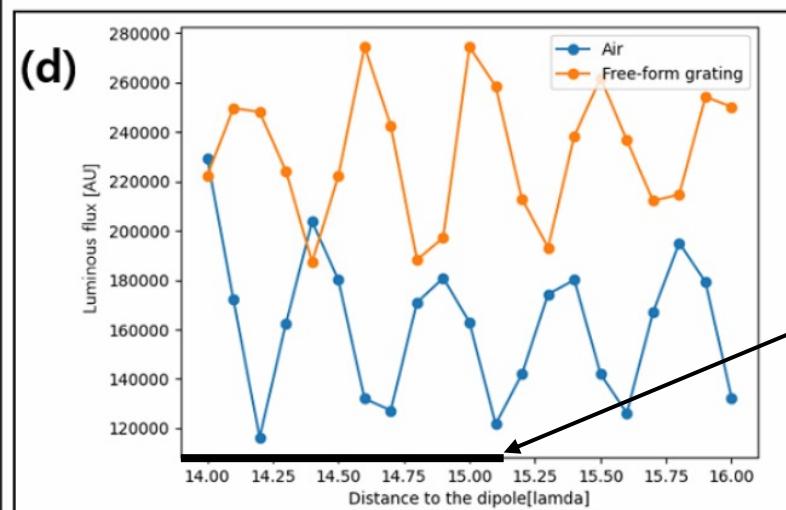
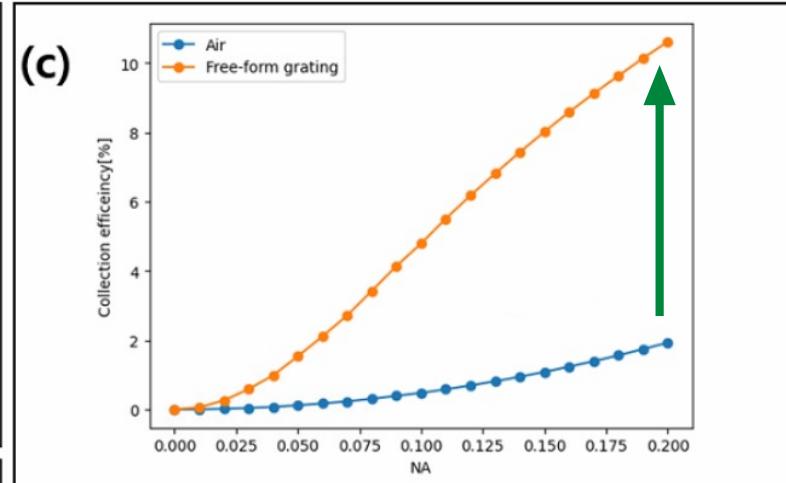
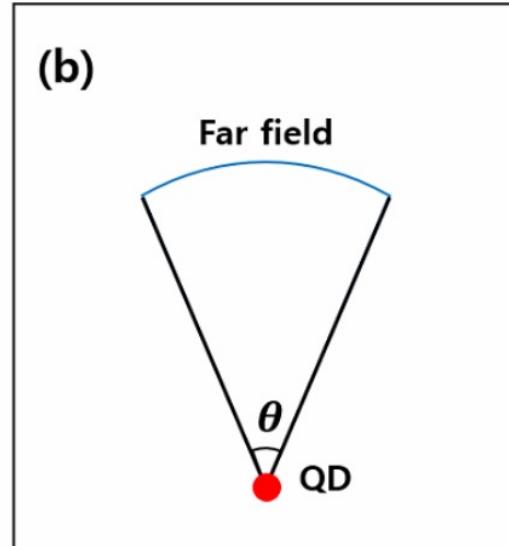
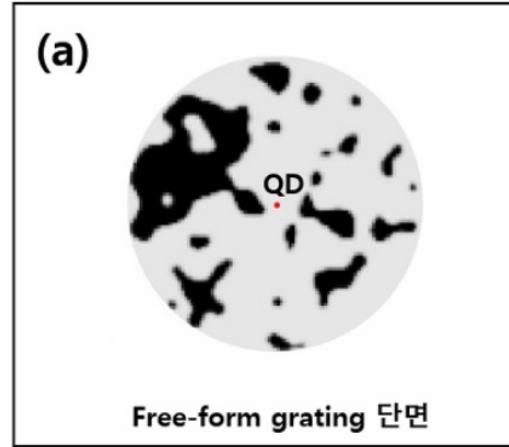


- Transfer2 과정에 대한 PL 측정 결과



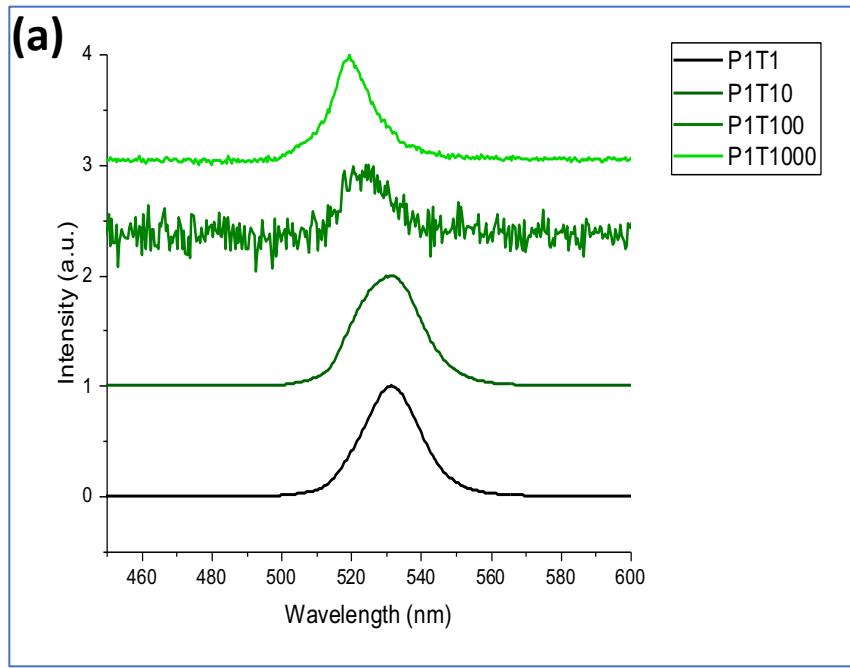
### 3. 연구 결과

#### ❖ 중간 소자 설계 결과

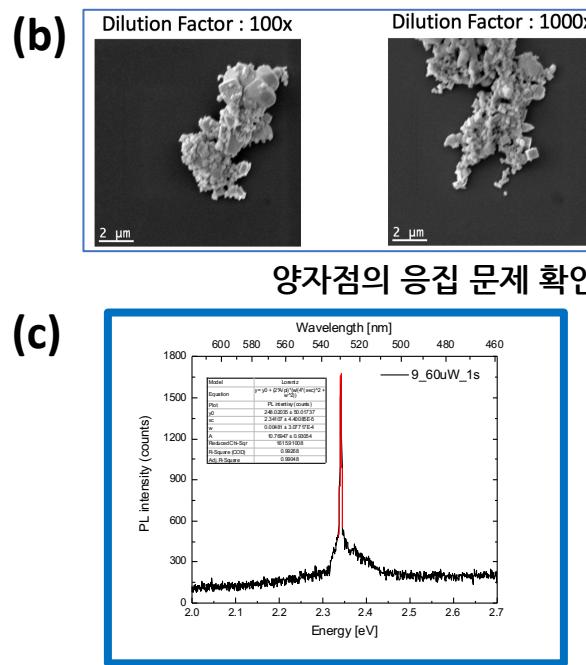
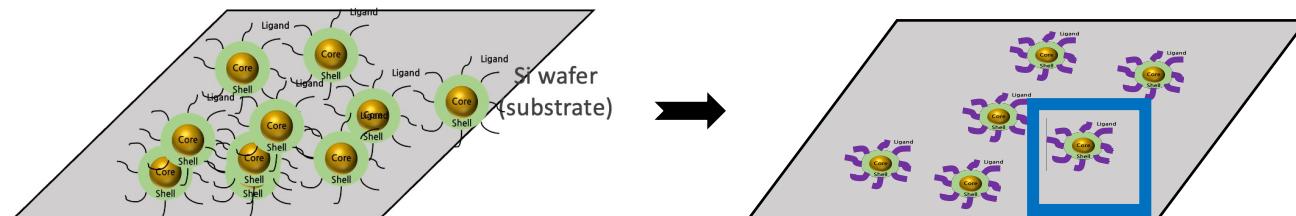


## 4. 결론

결론 1.  $\text{CsPbBr}_3$  단일 양자점을 얻는 조건 확립 및 양자점-광섬유 결합의 실증 필요



반치전폭 ~20 nm → “Ensemble”



단일 양자점 확보 성공

## 초기 가설 :

- 큰 희석도에서 단일 양자점 얻을 것으로 기대.

## 문제발생 :

- 희석도 증가에도 불구하고 일정한 반치전폭 확인. (a)

## 원인규명 :

- SEM 이미지 통해 양자점의 응집 이슈 확인. (b)

## 대안탐색 :

- 양자점의 리간드 조절 통한 응집 이슈 해결

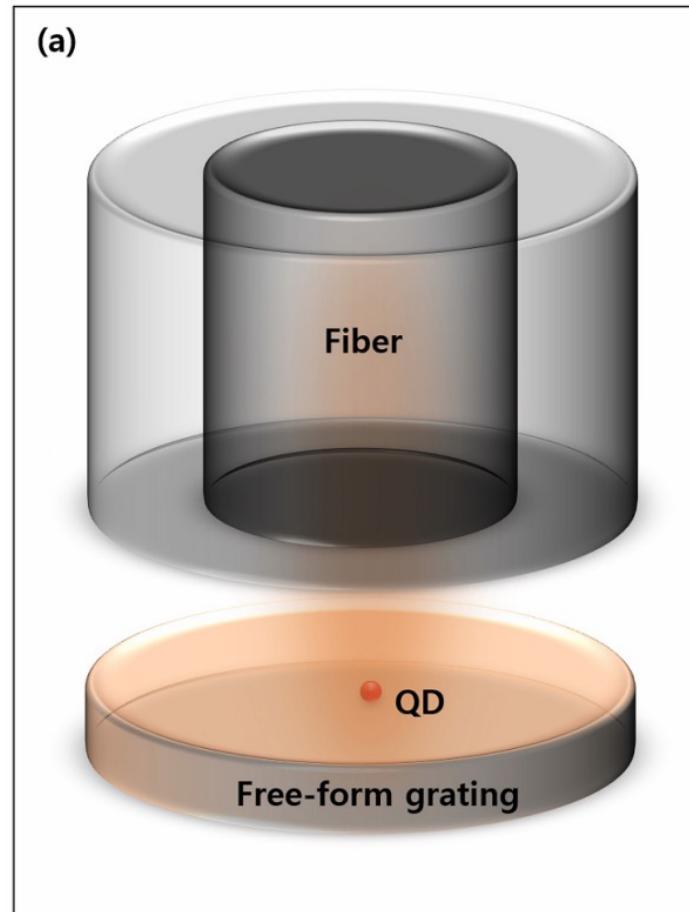
## 결론 :

- 양자점의 리간드를 조절 [OA/OAm  $\rightarrow$  Zwitterionic : Lecithin],  
이후 희석 Toluene 및 스픬 코팅

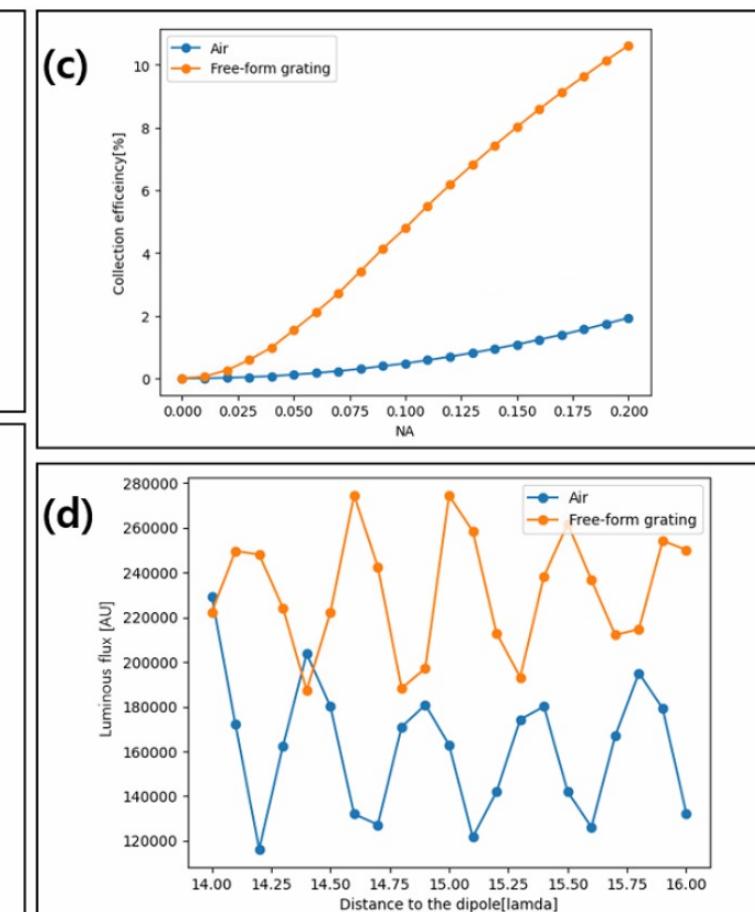
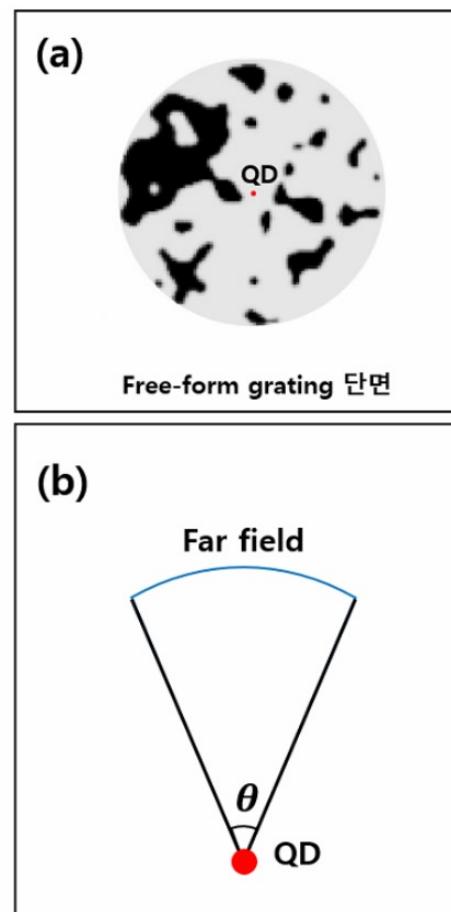
→ 단일 양자점을 얻었다. (c)

## 4. 결론

결론 2. CsPbBr<sub>3</sub> 단일 양자점-광섬유 결합에서 집광 효율 상승 위한 중간 소자 설계



시뮬레이션 구도



시뮬레이션 결과

→ NA ~ 0.2에서 집광 효율 5배 이상 기대

## 5. 후속 연구 제시 및 연구 의의

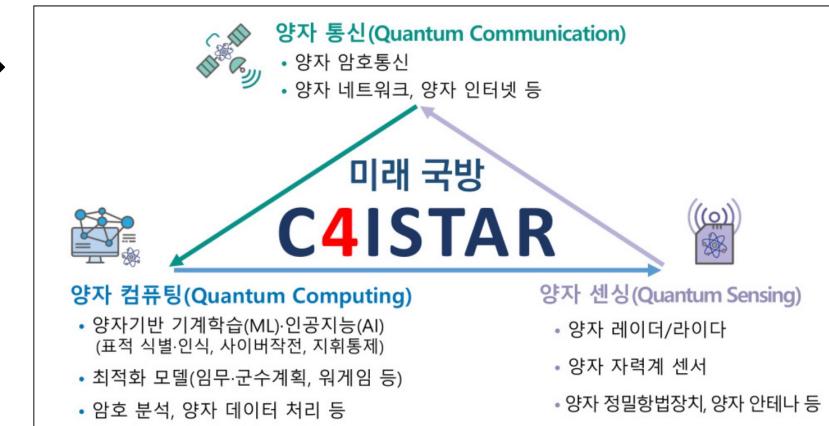
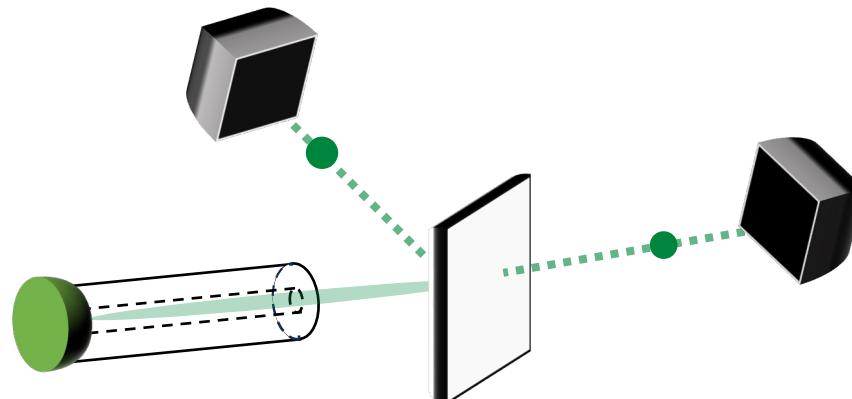
### “ $\text{CsPbBr}_3$ 단일 양자점 기반의 상온구동 가능한 유선 양자 암호통신 플랫폼 구축”

#### <This work>

- 단일 양자점(양자광원) 확보
- 중간 소자 설계
- 결합 방식 제시

#### <Future work>

- 설계한 광 소자, 선별한 단일 양자점을 광섬유와 결합.
- Hanbury Brown and Twiss(HBT) 측정을 통한 양자 광 송신 확인.
- 집광 효율의 향상 확인.



\* C4ISTAR : Command & Control, Computer, Communication, Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, Reconnaissance

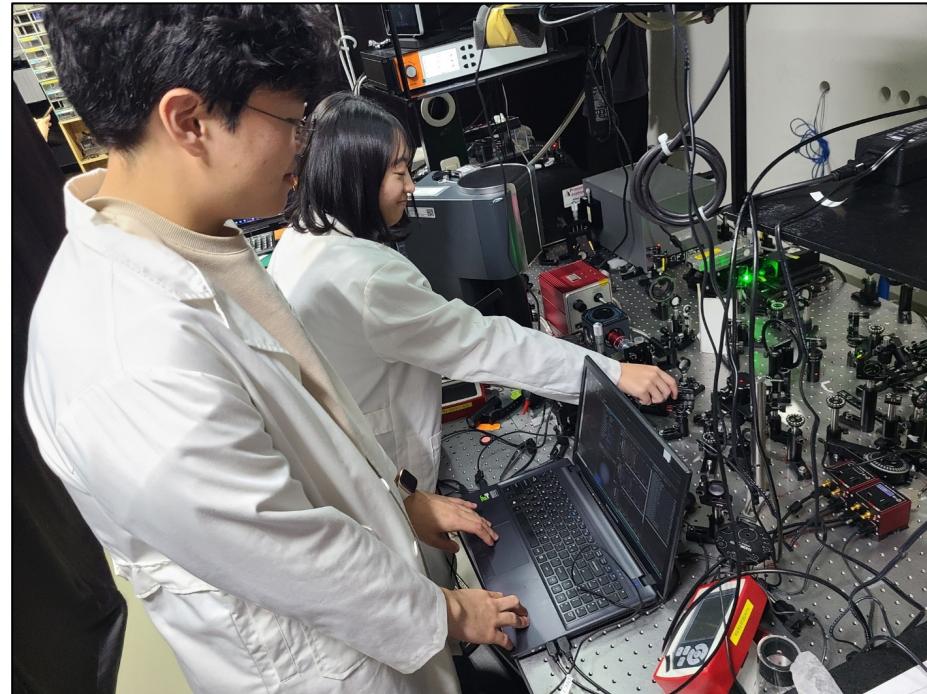
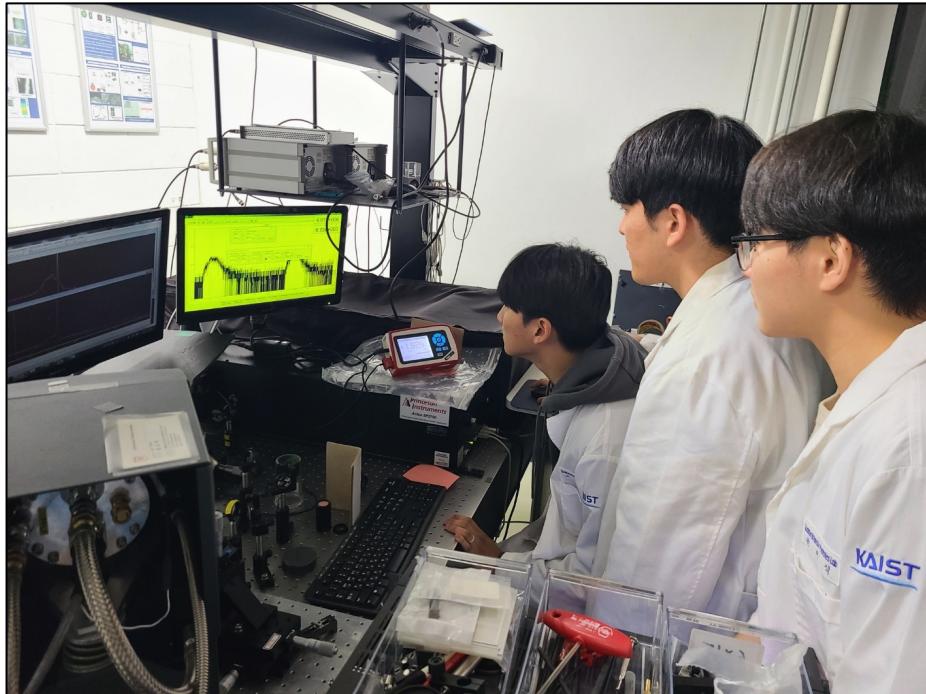
국방기술진흥연구소(2022), 미래 전장양상을 바꾸는 국방 양자 기술 10선

2023 밀리테크 챌린지

과제 번호 : 2023-2

## 보안 기반 유선 양자 암호통신을 위한 반도체 양자점-광섬유 결합 연구

-  $\text{CsPbBr}_3$  양자점-광섬유 결합 및 free form 중간 소자 설계를 통한 결합 최적화 -



발표를 들어주셔서 감사합니다.

Acknowledgement: 본 연구는 조용훈 교수님, 민승식 교수님, 김대식, 김병수 연구멘토님, QNP 랩 구성원분들의 지도에 힘입어, 과학기술전문사관 지원센터의 지원으로 수행되었습니다. 이에 진심으로 감사드립니다.