

SHORT COMMUNICATION

## 효율적인 수은이온 검출을 위한 피렌-보론산 기반의 형광센서 개발

이승엽 · 이성호\*

대구대학교 화학과

### A Pyrenylboronic Acid-based Fluorescence Sensor for Highly Efficient Detection of Mercury(II) Ions

Seung Yeob Lee, Seoung Ho Lee\*

Department of Chemistry, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

#### Abstract

A new chemosensor based on a self-assembled system has been devised to detect  $Hg^{2+}$  ions efficiently. We demonstrated that the amphiphilic building blocks consisting of pyrene and boronic acid (**1**) aggregate in aqueous solutions and provide an outstanding sensing platform for sensitive detection. The self-assembled **1** exhibited high selectivity and sensitivity for  $Hg^{2+}$  ion detection via fluorescence quenching, where the  $Hg^{2+}$  ion detection ensued from a fast transmetallation of **1**. The Stern-Volmer (SV) quenching constant for its fluorescence quenching by  $Hg^{2+}$  ions was approximately  $1.58 \times 10^8 M^{-1}$ . In addition, self-assembled **1** exhibited excellent sensing abilities at nano-molar concentration levels when tap water and freshwater samples were contaminated with of  $Hg^{2+}$  ions.

**Key words** : Mercury(II) ion sensors, Self-assembly; Amplified quenching

#### 1. 서론

전이금속 중의 하나인 수은은 화학, 제약, 생물학 등 다양한 분야에서 활용도가 높은 원소이다(World Health Organization, 2003). 그러나 지난 수십 년 동안 수은의 무분별한 사용은 각종 수은 오염의 원인이 되었으며 수은중독과 관련된 질병률을 증가시키는 등 환경적, 사회적으로 많은 문제를 일으켰다(Tchounwou et al., 2003). 수은은 증발하기 쉬우므로 다양한 경로를 통해 체내로 들어오게 되는데, 체내에 축적된 수은은 선단동통증, 헌

터 러셀 증후군(Hunter-Russel syndrome), 미나마타병(Minamata disease) 등과 같은 생체 내 신경 시스템과 관련된 질병을 유발한다(Weiss, 2007). 이러한 잠재적 위험성으로 인하여 미국 독성물질 질병 등록국(Agency for Toxic Substances and Disease Registry: ATSDR)에서는 수은을 세 번째로 많은 질병을 유발하는 물질로 분류하여 관리하고 있다(ATSDR, 1999). 또한, 미국 환경 보호국(US Environmental Protection Agency: EPA)과 세계 보건기구(World Health Organization: WHO)에서는 수은 오염에 대한 기준을 10 nM 이상의

Received 30 December, 2019; Revised 17 January, 2020;

Accepted 20 January, 2020

\*Corresponding author: Seoung Ho Lee, Department of Chemistry, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea  
Phone : +82-53-850-6444  
E-mail : [slee@daegu.ac.kr](mailto:slee@daegu.ac.kr)

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

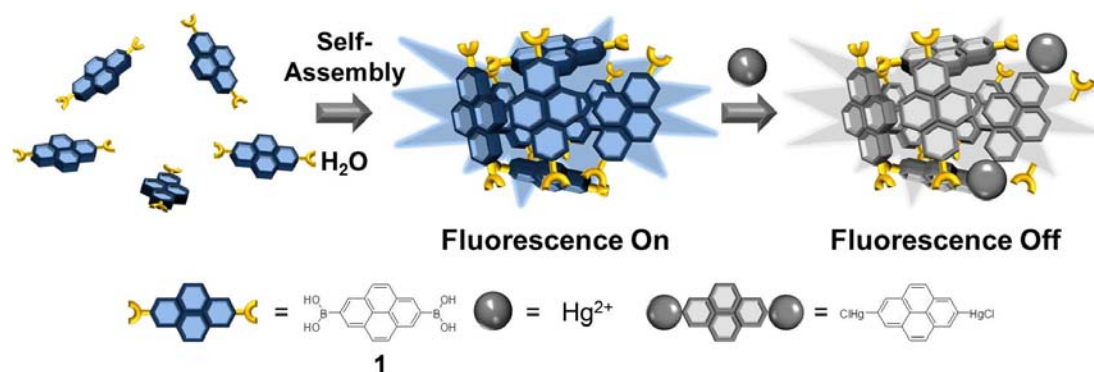


Fig. 1. Structure of 1 and schematic illustration of its self-assembly and plausible sensing process.

수은이온이 존재하는 경우로 지정하는 등 수은중독의 위험성에 대해 강조하고 있다(World Health Organization, 2011).

수은 오염으로부터의 위험성을 정량적으로 확인하기 위하여 다양한 물리적, 화학적 검출방법이 개발되었다(Nolan and Lippard, 2008). 일반적인 수은 검출방법은 가스 크로마토그래피(GC)와 원자흡수 분광법(AAS)으로써 이들 방법은 낮은 검출한계( $10^{-7}\%$  ppm)와 높은 정확도를 보여준다(Hoang et al., 2013). 그러나 이러한 분석방법은 크기가 크고 고가인 분석기기를 이용해야 할 뿐만 아니라 측정하는 과정에서 샘플을 화학적으로 처리하는 전처리과정이 수반되어야 하며, 숙련된 시험자가 다루어야 하는 등 분석과정이 쉽지 않다. 따라서 오랫동안 이러한 단점을 보완하기 위한 새로운 분석방법의 개발에 관한 연구가 활발하게 진행됐다. 그 중 형광화학센서(Fluorescence Chemical Sensor)는 신속하고 간편한 방법으로 감응도 면에서 기존의 분석방법보다 향상된 검출능력을 나타내고 있다(Wu et al., 2017).

형광화학센서는 기본적으로 수용체(Receptor)와 발광단(Luminosity)으로 구성되며 검출 대상 물질과 수용체와의 상호작용이 유도하는 형광 변화를 측정함으로써 대상 물질을 분석한다. 화학 센서의 기능을 효과적으로 수행할 수 있으려면 분자를 선택적으로 인식할 수 있어야 하며 그 결과를 형광의 변화로 쉽고 민감하게 나타낼 수 있어야 한다(Silva et al., 1997). 특히, 형광 센서의 센싱 감응성을 높이기 위하여 단분자, 고분자, 나노입자 기반의 다양한 플랫폼을 가지는 형광 센서가 개발되어 왔

다(Basabe-Desmonts et al., 2007). 그러나 지금까지 보고된 화학 센서는 상대적으로 낮은 센싱 감응성, 구조적 결함으로 인한 재현성 문제, 수용액에서의 낮은 용해도 및 형광양자수율 저하 등의 문제점을 가지고 있다(Chatterjee et al., 2017; Chen et al., 2019). 특히 과거 수십여 년 동안 센싱 감응성을 높이기 위한 많은 연구가 있었음에도 나노 몰(nM) 수준 또는 이하에서 센싱이 가능한 센서의 개발은 여전히 도전해야 할 부분이다.

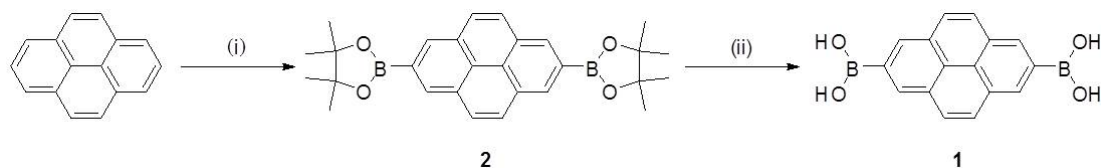
본 연구에서는 기존 화학 센서의 단점을 극복하고 수용액에서의 높은 용해도와 센싱 감응이 우수한 화학 센서를 개발하였다. Fig. 1.에서 나타내듯이 친수성 성질을 가진 Boronic acid를 소수성 성질의 Pyrene에 접목하여 양친매성 물질인 화합물 1을 합성하였다. 이렇게 친수성과 소수성을 모두 가진 화합물 1은 수용액에서 자기 조립을 통해 응집체를 형성한다(Fig. 1). 본 연구에서는 응집체를 형성한 화합물 1이  $\text{Hg}^{2+}$  이온과 반응하여 생기는 형광 변화를 관찰하고, 수돗물, 강물 등의 실제 조건에서  $\text{Hg}^{2+}$  이온을 효과적으로 센싱하는지를 확인하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료 및 기기

#### 2.1.1. 실험 재료

Pyrene, 4,4'-di-tert-butyl-2,2'-bipyridine, (1,5-cyclooctadiene) (methoxy)iridium(I) dimer는 Sigma-Aldrich 사에서 구입하였다. Bis(pinacolato)diboron, sodium hydroxide, cyclohexane, tetrahydrofuran,



**Fig. 2.** Synthesis of (i)  $B_2Pin_2$ ,  $IrOMe(COD)_2$ , dtbpy, cyclohexane, 80 °C; (ii)  $NaIO_4$ , 1 M HCl, THF/ $H_2O$ , room temperature.

ethyl acetate, dimethyl sulfoxide는 (주)대정화학에서 구매하였다. 물질의 정제는 Merck 사에서 구매한 Silica gel을 이용하였다. 다른 화학 물질과 용매들은 Fisher Scientific 및 Acros 사에서 구매하였다.

### 2.1.2. 실험 기기

NMR 기기는 Bruker 사의 AVANCE III 500를 사용하였으며,  $^1H$ -NMR은 500 MHz에서,  $^{13}C$ -NMR은 125 MHz에서 측정하였다. 각 신호의 화학적 이동(chemical shift)은 TMS(tetramethylsilane)를 내부기준 물질로 한  $CDCl_3$ 와 DMSO- $d_6$ 를 이용하여  $\delta$  (ppm) 단위로 표시하였다(multiplicity: s=singlet, d=doublet, t=triplet, q=quartet, m=multiplet). UV/Vis 흡수 스펙트럼은 Sinco 사의 Mega-2100 spectrometer를 사용하여 측정하였다. 형광 스펙트럼은 Shimadzu 사의 fluorometer RF-6000을 사용하여 측정하였다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 화합물 2의 합성방법

시클로헥산(cyclohexane) 20.0 mL을 아르곤으로 퍼징(purging)한 후 피렌(pyrene, 2.00 g, 9.89 mmol), bis(pinacolato)diboron (5.52 g, 21.8 mmol)을 넣고 1 시간 교반한다. (1,5-cyclooctadiene)(methoxy)iridium (I) dimer(0.06 g, 0.09 mmol)와 4,4'-di-tert-butyl-2,2'-dipyridyl (0.05 g, 0.18 mmol)을 첨가한 후 80 °C으로 16시간 동안 환류 교반한다. 반응이 완결되면 회전 증발기를 이용해 유기 용매를 제거한다. 컬럼 크로마토 그래피 (DCM:Hexane=1:3)을 이용하여 흰색의 고체인 화합물 2를 얻었다. Yield : 74%; mp 331-333°C;  $^1H$  NMR(500 MHz,  $CDCl_3$ , ppm):  $\delta$  8.63 (s, 2H), 8.16(d, 2H), 8.10 (d, 4H), 1.47(s 24H);  $^{13}C$  NMR (125 MHz,  $CDCl_3$ , ppm):  $\delta$  131.35, 130.42, 127.78, 126.35, 83.50, 25.03.

### 2.2.2. 화합물 1의 합성방법

화합물 2 (1.00 g, 2.20 mmol)를 THF/ $H_2O$ (20 mL/5 mL)에 녹이고,  $NaIO_4$ (3.93 g, 17.9 mmol)를 첨가한 뒤 40분간 실온에서 교반한다. 혼합액에 1M HCl (3 mL)를 첨가하고 실온에서 48시간 교반한다. 반응이 종결되면 회전 증발기를 이용해 유기 용매를 제거한다. 혼합물을 증류수와 ethyl acetate에 녹여 분별 깔때기에 넣고 섞어준다. 유기층을 추출하여  $MgSO_4$ 를 넣어 수분을 제거한다. 헥산(hexane)으로 여러 번 세척한 후 화합물 1을 얻었다. Yield : 78%; mp 331-333°C;  $^1H$  NMR(500 MHz, DMSO- $d_6$ , ppm): 8.67 (s, 4H), 8.42 (s, 4H), 8.14 (s, 4H);  $^{13}C$  NMR(125 MHz, DMSO- $d_6$ , ppm): 131.49, 130.44, 128.25, 125.28.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1. 합성

피렌을 출발물질로 하여 두 단계 반응으로 화합물 1을 합성하였다. 먼저, 이리듐 기반의 촉매 반응(C-H borylation)을 통하여 피렌의 2번 위치에 boronic ester를 접목한 화합물 2를 합성하였다(Crawford et al., 2012). 화합물 2의 boronic ester는  $NaIO_4$ 와 HCl을 이용해 boronic acid로 전환하여 화합물 1을 합성하였다. 각 화합물은  $^1H$ -NMR 및  $^{13}C$ -NMR을 이용하여 합성 여부를 확인하였다. 화합물 2의 boronic ester 그룹에 해당하는  $\delta$  1.47 ppm에서의 수소 피크와  $\delta$  83.50 ppm 및  $\delta$  25.03 ppm에서의 탄소 피크는 화합물 1의 NMR 스펙트럼에서는 발견되지 않았다. 즉, boronic ester가 boronic acid로 전환된 화합물 1이 합성되었음을 확인할 수 있었다.

### 3.2. 구조적 특성

화합물 1의 수용액 및 메탄올에서의 구조적 특성을

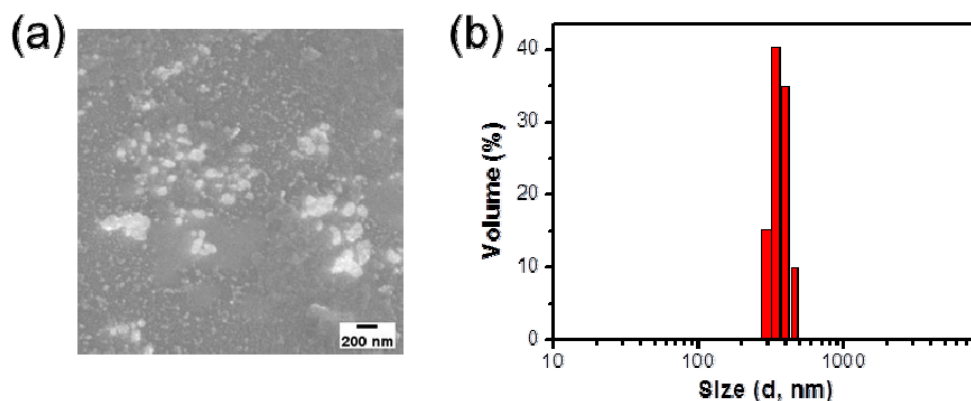


Fig. 3. (a) SEM image and (b) hydrodynamic radii obtained from DLS for **1** ( $5.0 \times 10^{-6}$  M) in  $H_2O$ .

주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)과 동적광산란법(Dynamic Light Scattering: DLS)을 이용해 분석하였다. 주사전자현미경 이미지는 화합물 **1** ( $5.0 \times 10^{-6}$  M)의 수용액을 carbon grid에 분포하여 측정하였다(Fig. 3a). 주사전자현미경 이미지를 통해 화합물 **1**은 자가조립(self-assembly)해 구형의 응집체를 형성함을 확인할 수 있었으며, 응집체의 평균 크기는 대략 230 nm를 나타냈다. 동적광산란법은 수용액 상에서 화합물의 응집 현상에 따른 입자의 크기 분포에 대한 정보를 제공한다. 화합물 **1** ( $5.0 \times 10^{-6}$  M) 수용액을 cuvette에 넣고 측정한 결과 평균 373 nm를 나타냈다(Fig. 3b). 이 결과는 화합물 **1**은 수용액에서 자가 조립하여 응집체를 형성한다는 것을 의미한다. 반면에 상대적으로 화합물 **1**을 잘 용해시키는 메탄올에서는 그 크기를 나타내는 어떠한 결과도 얻을 수 없었다. 이러한 결과는 화합물 **1**이 메탄올에서는 응집체가 아닌 각각 분리된 상태로 존재함을 나타낸다. 즉, 위 두 결과를 바탕으로 화합물 **1**은 수용액상에서 자가조립하여 일정 크기를 갖는 입자 형태로 존재한다는 것을 증명하였다.

### 3.3. 광물리학적 특성

#### 3.3.1. 선택성(Selectivity) 실험

수용액상에서 응집된 화합물 **1**의 특정 금속이온에 대한 선택성을 알아보기 위해 다양한 금속이온 존재하에 형광스펙트럼을 측정하였다. Fig. 4에서 나타내듯이 화합물 **1** ( $5.0 \times 10^{-6}$  M) 수용액에 과량의 다양한 금속 이온들( $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Ag^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,

$Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ , 그리고  $Fe^{3+}$ )을 첨가하여 형광 변화를 측정된 결과  $Hg^{2+}$ 이온은 화합물 **1**의 형광을 효과적으로 소광시켰으며,  $3.0 \times 10^{-6}$  M의  $Hg^{2+}$ 이온을 첨가하였을 때 대략 97.8%의 형광이 소광되었다. 반면에 다른 금속 이온들은 무시할 정도의 형광 소광을 나타내었다. 화합물 **1**의  $Hg^{2+}$ 이온에 대한 선택성은 aryl boronic acid와  $Hg^{2+}$ 이

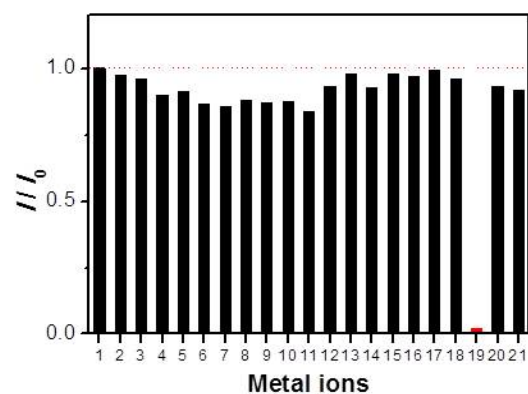


Fig. 4. Fluorescence intensity change of **1** ( $5.0 \times 10^{-6}$  M) in  $H_2O$  upon addition of various metal ions ( $1.0 \times 10^{-5}$  M). The chloride salts of metal ions: 1: blank, 2:  $Li^+$ , 3:  $Na^+$ , 4:  $K^+$ , 5:  $Cs^+$ , 6:  $Mg^{2+}$ , 7:  $Ca^{2+}$ , 8:  $Sr^{2+}$ , 9:  $Ba^{2+}$ , 10:  $Mn^{2+}$ , 11:  $Fe^{2+}$ , 12:  $Fe^{3+}$ , 13:  $Co^{2+}$ , 14:  $Ni^{2+}$ , 15:  $Cu^{2+}$ , 16:  $Ag^+$ , 17:  $Zn^{2+}$ , 18:  $Cd^{2+}$ , 19:  $Hg^{2+}$ , 20:  $Sn^{2+}$ , 21:  $Pb^{2+}$ . Excitation at 335 nm, fluorescence intensity was monitored at 387 nm.

은 간의 Transmetallation으로 유발된 것이라 보인다 (Matsushita et al., 2005). Hg<sup>2+</sup>이온과 착물(Complex)을 형성한 화합물 1의 형광 소광은 피렌의 들뜬상태가 된 전가가 Hg<sup>2+</sup>이온으로 electron transfer가 발생하여 생긴 것으로 판단된다.

### 3.3.2. 감응성(Sensitivity) 실험

화합물 1의 용액에 Hg<sup>2+</sup>이온을 적가하여 나타나는 형광 변화를 통해 Hg<sup>2+</sup>이온에 대한 감응성을 측정하였다. 5.0 × 10<sup>-6</sup> M의 화합물 1 수용액 및 메탄올 용액에 Hg<sup>2+</sup>이온을 적가하여 형광 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과 응집체가 형성된 수용액에서는 저농도의 Hg<sup>2+</sup>이온에도 효율적으로 형광소광을 나타냈었다(Fig. 5a). 그러나 분리된 형태로 존재하는 메탄올에서는 과량의 Hg<sup>2+</sup>이온을 적가해야 형광의 변화가 나타남을 볼 수 있었다(Fig. 5b). Fig. 5c에서 나타내듯이 Hg<sup>2+</sup>이온의 적가에 따른 수용액 및 메탄올에서의 Stern-Volmer (SV) plot은 형광소광에 대한 효율성을 잘 설명한다. 수용액에서는 Hg<sup>2+</sup>이온을 적가함에 따라 비선형의 증폭된 형광소광(amplified quenching)을 보이며, SV quenching 상수는  $K_{sv} = 1.6 \times 10^8 M^{-1}$ 으로 매우 높게 측정되었다. 반면에 메탄올에서는 낮은 기울기를 나타내며 상대적으로 작은 SV quenching 상수( $K_{sv} = 5.3 \times 10^5 M^{-1}$ )값을 나타내었다. 이 결과는 화합물의 응집체 형성 여부가 Hg<sup>2+</sup>이온에 대한 감응성에 영향을 준다는 것을 나타낸다. 이러한 응집된 화합물 1의 향상된 소광 효과는 기존 고분자 기반의 형광 센서에서 나타나는 것처럼 응집된 화합물 1 내에서 피렌 작용기들 사이의 상호작용이 효율적인 전자 전달을 유발하기 때문으로 판단된다.

### 3.4. 수돗물 및 강물에서의 Hg<sup>2+</sup>이온 검출

응집된 화합물 1이 수돗물 및 강물과 같은 실질적인 조건에서 Hg<sup>2+</sup>이온을 효과적으로 검출하는지 확인하였다. 수돗물 및 강물에 화합물 1을 넣고 Hg<sup>2+</sup>이온을 적가한 후 형광 스펙트럼의 변화를 정제수를 사용한 경우와 비교하였다(Fig. 6a). 수돗물 및 강물에서 화합물 1은 정제수를 사용한 경우와 마찬가지로 Hg<sup>2+</sup>이온과 반응하여 형광 소광을 나타낸다. 수돗물 및 강물에서 Hg<sup>2+</sup>이온 적가 하였을 때 화합물 1의 소광에 따른 SV quenching 상수는 각각  $K_{sv} = 2.2 \times 10^6 M^{-1}$ 와  $K_{sv} = 1.9 \times 10^6 M^{-1}$ 으로 수용액에서의 상수 ( $K_{sv} = 1.6 \times 10^8 M^{-1}$ )와는 다소

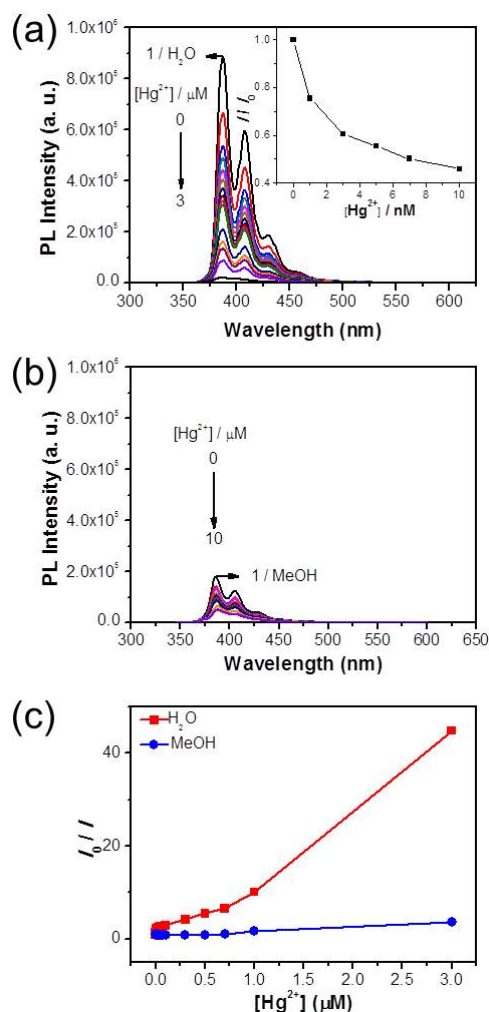
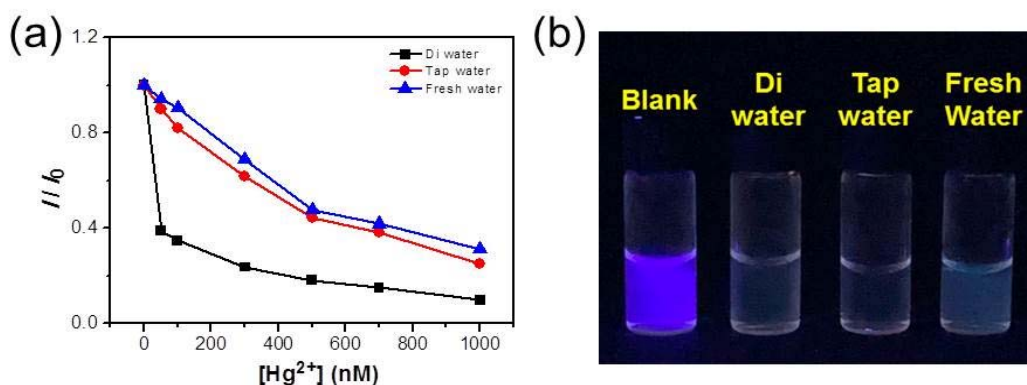


Fig 5. Fluorescence intensity change of 1 (5.0 × 10<sup>-6</sup> M) in H<sub>2</sub>O upon the addition of various amounts of Hg<sup>2+</sup>ion in (a) H<sub>2</sub>O and (b) MeOH; (c) Stern-Volmer (SV) plot of 1 (5.0 × 10<sup>-6</sup> M) titrated with Hg<sup>2+</sup>ions in H<sub>2</sub>O and MeOH.

차이를 보이지만 매우 높은 상수값을 나타냈다. 이 결과는 화합물 1이 다양한 경쟁 물질이 존재하는 실질적인 조건에서도 Hg<sup>2+</sup>이온에 대해 높은 감응성을 나타낸다는 것을 보여준다. Fig. 6b는 화합물 1을 이용해 Hg<sup>2+</sup>이온을 정제수, 수돗물, 강물에서 가시적으로 관찰할 수 있는지를 나타낸다. 샘플병에 정제수, 수돗물, 강물을 넣고 화합물 1(5.0 × 10<sup>-6</sup> M) 용액을 만들어 각각의 용액 안에





**Fig. 6.** (a) Titration profile of 1 ( $5.0 \times 10^{-6}$  M) with  $\text{Hg}^{2+}$  ions in Di water, tap water and fresh water. Excitation at 335nm; fluorescence intensity was monitored at 387 nm and (b) Fluorescence of Probe 1 in vial exposed to various  $\text{Hg}^{2+}$  ion in various water condition: Blank, Di water, Tap water, and Fresh water.

$5.0 \times 10^{-6}$  M  $\text{Hg}^{2+}$  이온을 첨가 후 형광 변화를 측정하고 결과 각 용액에서  $\text{Hg}^{2+}$  이온의 유무를 가시적으로 관찰할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수은을 검출하는 자기 조립 기반의 새로운 센서를 개발하였다. 양친매성 물질인 화합물 1은 수용액에서 응집체를 형성하며 극미량의  $\text{Hg}^{2+}$  이온에 대해 높은 선택성과 감응성을 보여주었다. 화합물 1의  $\text{Hg}^{2+}$  이온에 대한 높은 감응성은 응집된 화합물 1 내의 피렌 작용기 간의 상호작용으로 인한 효율적인 전자이동 효과 때문이다. 화합물 1의 높은 선택성과 감응성으로 인해 다양한 경쟁 물질이 존재하는 수돗물, 강물 같은 실제 조건에서도  $\text{Hg}^{2+}$  이온에 대해 효율적으로 형광 소광을 나타내며 실제적인 응용이 가능할 것이라 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2019년 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R111A3A01058982).

#### REFERENCES

Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999, Toxicological profile for mercury, TP-93/10,

Department of health and human services, Public Health Service., Atlanta, USA.

Basabe-Desmonts, L., Reinhoudt, D. N., Crego-Calama, M., 2007, Design of fluorescent materials for chemical sensing, *Chem. Soc. Rev.*, 36, 993-1017.

Chatterjee, A., Banerjee, M., Khandare, D. G., Gawas, R., Mascarenhas, S. C., Ganguly, A., Gupta, R., Joshi, H., 2017, An AIE-based chemodosimeter approach for selective sensing and imaging of  $\text{Hg}(\text{II})$  and methylmercury species, *Anal. Chem.*, 89, 12698-12704.

Chen, Y., Tan, Y., Tan, C., Lu, Y., Chen, Y., Jiang, Y., 2019, Naphthalimide-containing conjugated polyelectrolytes with different chain configurations, *Org. Biomol. Chem.*, 17, 2635-2639.

Crawford, A. G., Liu, Z., Mkhaliid, I. A. I., Thibault, M. H., Schwarz, N., Alcaraz, G., Steffen, A., Collings, J. C., Batsanov, A. S., Howard, J. A. K., Marder, T. B., 2012, Synthesis of 2- and 2,7-functionalized pyrene derivatives: an application of selective C-H borylation, *Chem. Eur. J.*, 18, 5022-5035.

Hoang, C. V., Oyama, M., Saito, O., Aono, M., Nagao, T., 2013, Monitoring the presence of ionic mercury in environmental water by plasmon-enhanced infrared spectroscopy, *Sci. Rep.*, 3, 1175-1180.

Matsushita, M., Meijler, M. M., Wirsching, P., Lerner, R. A., Janda, K. D., 2005, A blue fluorescent antibody-cofactor sensor for mercury, *Org. Lett.*, 7, 4943-4946.

- Nolan, E. M., Lippard, S. J., 2008, Tools and tactics for the optical detection of mercuric ion, *Chem. Rev.*, 108, 3443-3480.
- Silva, A. P., Gunaratne, H. Q., Gunnlaugsson, T., Huxley, A. J., McCoy, C. P., Rademacher, J. T., Rice, T. E., 1997, Signaling recognition events with fluorescent sensors and switches, *Chem. Rev.*, 97, 1515-1566.
- Tchounwou, P. B., Ayensu, W. K., Ninashvili, N., Sutton, D., 2003, Environmental Exposure to mercury and Its toxicopathologic implications for public health, *Environ. Toxicol.*, 18, 149-175.
- Weiss, B., 2007, Why methylmercury remains a conundrum 50 years after minamata, *Toxicol. Sci.*, 97, 223-225.
- World Health Organization, 2003, Elemental mercury and inorganic mercury compounds: Human health aspect, Concise International Chemical Assessment Document 50, Geneva, Switzerland.
- World Health Organization, 2011, Guidelines for drinking water - 4th edition., Geneva, Switzerland.
- Wu, D., Sedgwick, A. C., Gunnlaugsson, T., Akkaya, E. U., Yoon, J., James, T. D., 2017, Fluorescent chemosensors: the past, present and future, *Chem. Soc. Rev.*, 46, 7105-7123.
- 
- Graduate student. Seung-Yeob Lee  
Department of Chemistry, Daegu University  
hyaloidsides@naver.com
  - Professor. Seung-Ho Lee  
Department of Chemistry, Daegu University  
slee@daegu.ac.kr