

## 알칼리 금속이 도핑된 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매의 제조

강석환\* · 전용구\* · 송기창†

건양대학교 의료신소재학과  
35365 대전광역시 서구 관저동로 158  
\*주유니플라텍 기술연구소  
34324 대전시 대덕구 신일동로 105  
(2025년 12월 13일 접수, 2026년 2월 2일 채택)

## Preparation of of Alkali Metal-Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Photocatalysts

Suk Hwan Kang\*, Young Gu Cheun\* and Ki Chang Song†

Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon, 35365, Korea  
\*Research Institute of Uniplatek Co. 105 Shinildong-ro, Daeduck-gu, Daejeon, 34324, Korea  
(Received 13 December 2025; Accepted 2 February 2026)

### 요 약

그래핀 탄소질소(g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 광촉매는 밴드갭이 2.80 eV의 상대적으로 낮은 밴드갭을 가져 가시광선 영역에서 활성화될 수 있으며, 탄소-질소 원자 간의 강한 공유결합으로 인해 열화학적 안정성이 우수하다. 그러나 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 가시광선 광촉매로 사용되기 위해서는 아직 밴드갭이 크다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 melamine을 출발물질로 사용하여 520°C의 고온 반응에 의해 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매를 합성하고, 여기에 알칼리 금속 수산화물(LiOH, NaOH, KOH)을 첨가한 후 다시 500°C에서 열처리하여, 알칼리 금속 이온이 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매를 합성하였다. 그 후 FT-IR, XPS, XRD, UV-Vis spectrometer 등의 다양한 분석 기기를 사용하여 광촉매의 물리적 및 화학적 특성을 평가하였다. XRD 분석에서 27.5°에서의 강한 피크를 확인하였고, 이 결과로부터 성공적으로 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매가 합성되었음을 알 수 있었다. 또한 알칼리 금속이 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매들은 알칼리 금속이 도핑되지 않은 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매의 2.80 eV에 비해 더 낮은 밴드갭을 가지며, 그중에서도 K 금속을 도핑 시 밴드갭 에너지가 2.56 eV로 가장 낮아지는 것을 알 수 있었다. 밴드갭 에너지가 감소할수록 낮은 에너지의 광을 통해서도 광여기에 의해 전자와 정공을 쉽게 발생시킬 수 있으므로, 본 연구를 통해 개발된 알칼리 금속으로 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매들은 효과적인 가시광선 광촉매로서 사용될 수 있다고 판단된다.

**Abstract** – Graphene-based carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) photocatalyst has a relatively narrow band gap of 2.80 eV, which makes it active in the visible light range. Furthermore, the strong covalent bonds between carbon and nitrogen atoms provide excellent thermochemical stability. However, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst still has a high band gap, which hinders its use as a visible light photocatalyst. To overcome this limitation, in this study, melamine was used as a starting material and the g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst was synthesized by a high-temperature reaction at 520°C. To this, alkali metal hydroxides (LiOH, NaOH, KOH) were added, respectively, followed by heat treatment at 500°C to synthesize alkali metal ion-doped M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalysts. The physical and chemical properties of the photocatalysts were then evaluated using various analytical equipments, including FT-IR, XPS, XRD, and UV-Vis spectrometer. XRD analysis confirmed a strong peak at 27.5°, which indicated that the g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst was successfully synthesized. In addition, the alkali metal-doped M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalysts had narrower band gaps than the alkali metal-free g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst (2.80 eV), and among them, the band gap energy was found to be the lowest at 2.56 eV when K metal was doped. As the band gap energy decreases, electrons and holes can be easily generated by photoexcitation even with low-energy light, so it is judged that the alkali metal-doped M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalysts developed through this study can be used as effective visible-light photocatalysts.

Key words: Graphene-based carbon nitride, Alkali metal doping, Band gap energy, Visible light photocatalyst

† To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: songkc@konyang.ac.kr

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.

### 1. 서 론

광촉매는 빛에너지를 흡수해 여기 전자와 정공을 생성하고, 가전  
자대(valance band)에서 환경오염 물질이 직접 산화된다. 전도대

(conduction band)에서는 여기 전자에 의해 산소가 환원되면서 활성 산소종이 형성되고, 이는 추가적인 오염물질의 산화를 유도한다[1]. 이러한 광촉매 반응이 일어나기 위해서는 밴드갭(band gap) 이상의 빛 에너지가 필요하다. 그러나 대부분의 광촉매는 밴드갭이 커 자외선 영역의 고에너지 빛이 조사되어야 한다. 태양광선의 스펙트럼은 3~5%가 자외선이고, 44~47%는 가시광선이며 51~53%가 적외선으로 구성되어 있다[2]. 따라서 광촉매의 실용적 활용을 위해서는 가시광선 영역에서 활성화될 수 있는 소재 개발이 필요하다.

그래핀 탄소질소( $g-C_3N_4$ )는 밴드갭이 2.80 eV의 상대적으로 좁은 밴드갭을 가져 가시광선 영역에서 활성화될 수 있으며, 탄소-질소 원자간 강한 공유결합으로 인해 열화학적 안정성이 우수하다[3].  $g-C_3N_4$ 는 탄소와 질소로 구성되어 있는 tris-s-triazine(heptazine)의 반복된 배열로 고분자의 구조와 유사하며, 배열은 2차원 평면 구조가 층상을 이루고 있다. 또한  $g-C_3N_4$ 는 지구에 풍부한 원소인 C와 N로 이루어져 있어 원료가 되는 물질들을 쉽고 값싸게 구할 수 있으므로 특성이나 비용적인 측면에서 다른 광촉매보다 상용화하기가 쉽다[4]. 이러한 특성으로 인해  $g-C_3N_4$ 는 환경오염 물질의 산화 제거를 위한 광촉매 소재로 유망하다. 그러나  $g-C_3N_4$ 가 가시광선 광촉매로 사용되기 위해서는 아직 밴드갭이 크다는 문제점이 있어 순수한  $g-C_3N_4$  만으로는 가시광선 조사 시 오염물질의 분해 능력이 낮다는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위하여 금속 및 비금속 이온 도핑, 공극 구조 확장 및 개선, 이중 접합 구조 형성 등의 다양한 연구전략이 제안되었다[5-6]. 그 중에서도 금속 이온 도핑을 통한 방법은  $g-C_3N_4$  광촉매 활성을 증가시키는 효과적인 접근법으로 입증되었으나[7], 다양한 알칼리 금속으로 도핑된  $g-C_3N_4$  광촉매들의 차이점을 조사한 연구는 많이 진행되지 않았다.

본 연구에서는 melamine을 출발물질로 이용하여  $g-C_3N_4$  광촉매를 합성한 후, 여기에 다양한 알칼리 금속 수산화물(LiOH, NaOH, KOH)을 첨가한 후 고온 반응을 통해 알칼리 금속이 도핑된 M- $g-C_3N_4$  광촉매를 합성하였다. 합성된  $g-C_3N_4$  광촉매를 다양한 분석 장비를 이용하여 물리·화학적 특성을 분석하였다. 또한 본 연구를 통해 개발된 알칼리 금속으로 도핑된 M- $g-C_3N_4$  광촉매들이 효과적인 가시광선 광촉매로서 사용될 수 있는지의 여부를 검토하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시약 및 재료

$g-C_3N_4$  광촉매의 전구체로 사용한 melamine(99%)은 (주)대정화금에서 구입하였다. 또한  $g-C_3N_4$  광촉매의 금속 이온 도핑을 위한 알칼리 금속 수산화물인 LiOH(95%), NaOH(98%), KOH(93%)를 (주)대정화금에서 구입하였다.

### 2-2. $g-C_3N_4$ 광촉매 합성

$g-C_3N_4$  광촉매는 melamine을 출발물질로 사용하여 다음과 같이 합성되었다. Melamine 200 g을 덮개가 있는 도가니에 넣고 며플러 전기로에서 2°C/min의 가열 속도로 Ar 분위기에서 350°C에서 2 h, 390°C에서 2 h, 520°C에서 2 h 동안 각각 소성하였다. 열처리를 통해 얻어진 노란색 분말을 실온에서 자연 냉각한 후 증류수와 에탄올로 충분히 세척한 다음 60°C에서 12 h 동안 건조하여 최종의  $g-C_3N_4$  광촉매를 얻었다.

### 2-3. 알칼리 금속으로 도핑된 M- $g-C_3N_4$ 광촉매 합성

알칼리 금속이 도핑된 M- $g-C_3N_4$  광촉매를 합성하기 위해 알칼리 금속(Li, Na, K)의 질량을  $g-C_3N_4$ 에 대해 2 wt%로 고정하여 위의 2-2절의 방법을 통해 제조된  $g-C_3N_4$  50 g에 해당 양의 알칼리 금속을 첨가하여 500 mL 증류수 내에서 혼합시켰다. 그 후 혼합물을 5 h 동안 교반 반응시키고, 30 min 동안 용액을 초음파 처리한 후 100°C로 건조시켜 물을 제거하였다. 건조된 시료를 균일하게 잘 분쇄하고 500°C에서 2 h 동안 Ar 분위기 하에서 소성하여 알칼리 금속이 도핑된 M- $g-C_3N_4$  광촉매를 제조하였다.

### 2-3. 광촉매의 물성 측정

FT-IR (Cary 630, Agilent Technologies)을 이용하여 광촉매의 화학적 구조를 확인하였고, 광촉매의 표면 조성 및 화학적 상태는 X선 광전자 분광기(XPS, Nexsa G2, Thermo Scientific)를 사용하여 분석하였다. 광촉매의 결정 구조는 X선 회절분석기(XRD, SmartLab, Rigaku)를 사용하여 측정하였다. 또한 제조된 광촉매의 흡광도와 확산 반사율을 측정하기 위하여 300~800 nm 파장에서 UV-Vis spectrophotometer(UV-2600, Shimadzu)를 사용하였고, 흡광도를 이용하여 Kubelka-Munk식을 기반으로 밴드갭 에너지를 계산하였다[8].

## 3. 결과 및 토론

### 3-1. $g-C_3N_4$ 광촉매 합성 메커니즘

출발물질인 melamine으로부터  $g-C_3N_4$  광촉매의 합성법은 기존 문헌에 잘 보고되어 있으며[9], 본 논문에서는 고온 축합 반응에 의해 melamine( $C_3H_6N_6$ )으로부터  $g-C_3N_4$  광촉매의 합성 메커니즘을 Fig. 1로 나타내었다. 출발물질인 melamine은 중심에 1,3,5-triazine 고리 구조를 가지며, 고리 내 각각의 탄소 원자에는 아미노기( $-NH_2$ )가 하나씩 결합되어 있는 유기 질소 화합물로, 350°C로 열처리하면 triazine 고리로부터 아미노기( $-NH_2$ )가 열적으로 탈리하여 축합 중합을 통해 두 개의 triazine 고리가 연결된 melam( $C_6N_{11}H_3$ )으로 전환된다. 생성된 melam을 다시 390°C로 열처리하면 연속적인 축합 반응을 거쳐 세 개의 triazine 고리가 연결된 heptazine 구조를 갖는 melem( $C_6N_{10}H_6$ )이 생성된다. Melem을 다시 520°C로 열처리하면 melem의 중합 반응이 일어나 melem의 반복 단위 구조를 갖는 고분자인  $g-C_3N_4$  광촉매가 생성되게 된다. 그러나 고분자 구조의  $g-C_3N_4$ 는 600°C 이상의 온도에서 불안정해지고 분해되기 시작하며, 열분해 온도가 700°C 보다 높아지면  $N_2$  가스와 CN기(cyano group) 분자 조각으로 분해된다. 따라서 본 연구에서 열분해 축합 중합으로 제조되는  $g-C_3N_4$ 의 최적 온도는 일반적으로 500~600°C 범위라고 판단된다.

### 3-2. 알칼리 금속(Li, Na, K)이 도핑된 M- $g-C_3N_4$ 광촉매의 제조

Fig. 2는 알칼리 금속(Li, Na 또는 K)의 도핑으로 얻어진  $g-C_3N_4$  광촉매의 외관을 나타낸 그림이다. 도핑되지 않은  $g-C_3N_4$  광촉매는 흰색의 외관을 나타내었으나, 알칼리 금속으로 도핑된 M- $g-C_3N_4$  광촉매들은 약간 노란색을 나타내었으며, 도핑된 알칼리 금속의 종류에 따라 색상이 달라짐을 알 수 있었다. 본 연구에서는 다양한 분석기기를 사용하여 합성된 광촉매들의 물리적 및 화학적 물성을 측정하였다.

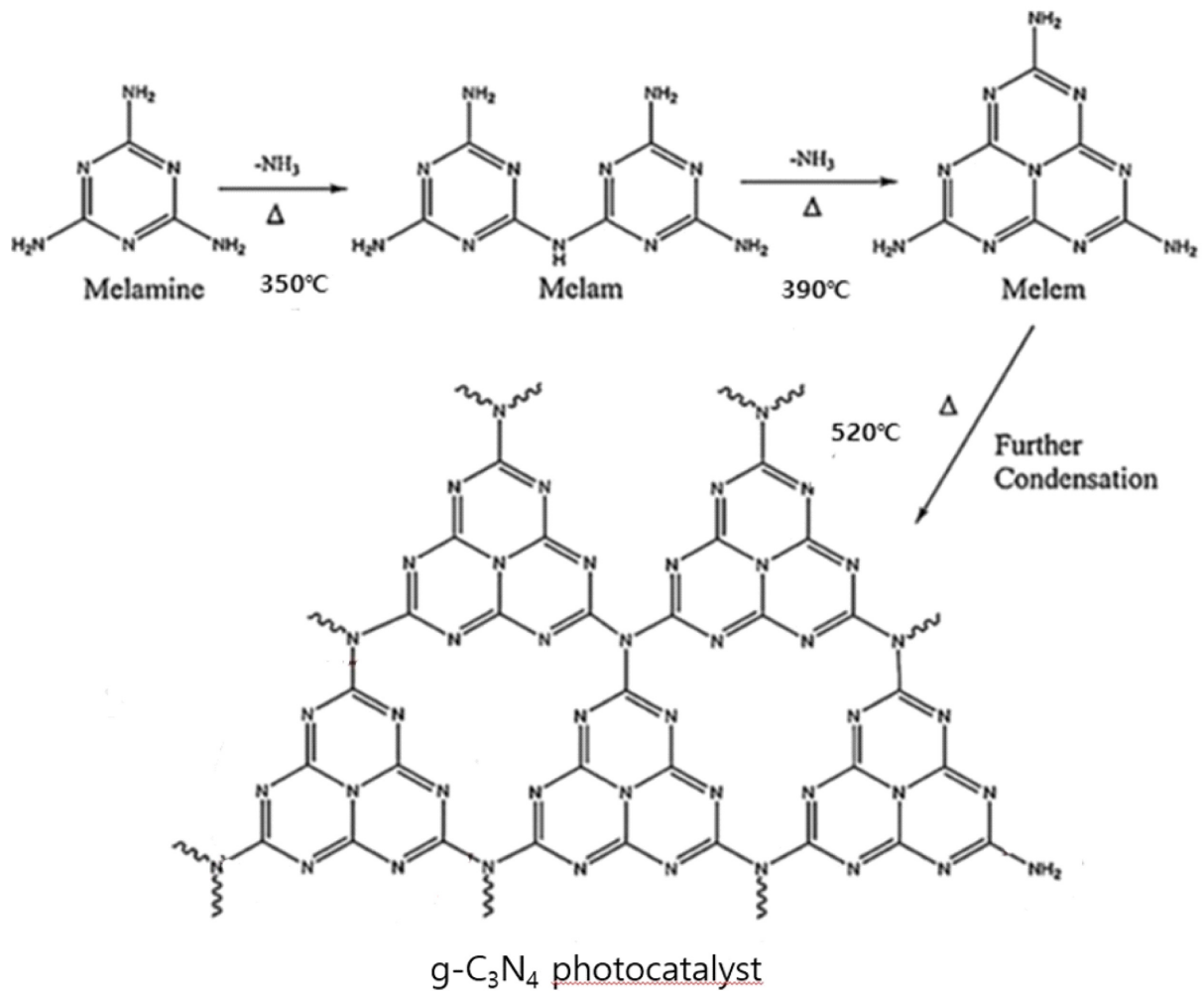


Fig. 1. Preparation process of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst by thermal condensation reaction from melamine as a starting material.

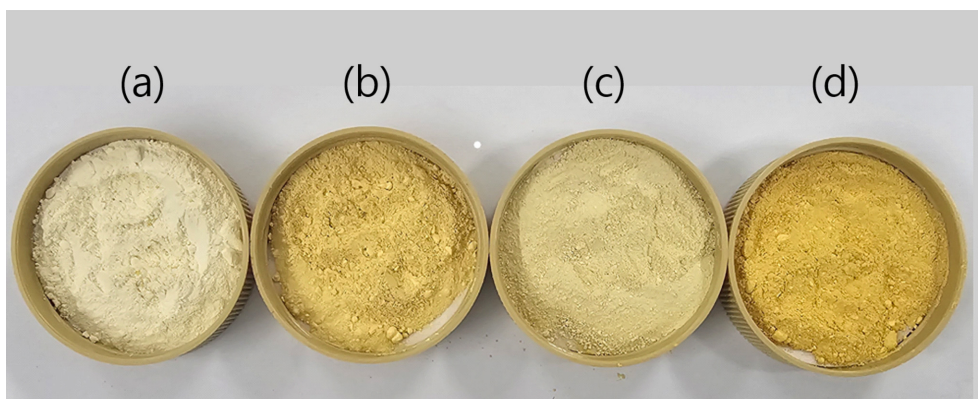


Fig. 2. Photographs of (a) undoped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> doped with (b) Li<sup>+</sup>, (c) Na<sup>+</sup> and (d) K<sup>+</sup> ions.

3-2-1. FT-IR 분석

Fig. 3은 도핑되지 않은 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매와 다양한 알칼리 금속들 (Li, Na, K)로 2 wt%씩 도핑시켜 제조된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매들의 화학적 구조를 나타낸 FT-IR 스펙트럼이다. 3000-3500 cm<sup>-1</sup>사이의 넓은 범위의 피크는 N-H기의 신축 운동과 광촉매 내에 남아있는 물 분자로부터의 O-H 기의 신축 운동으로 인해 발생된다[10]. 1635 cm<sup>-1</sup>에서의 흡수 밴드는 방향족 heterocyclic ring의 CN stretching 진동에 기인

되며[10], 1567 cm<sup>-1</sup>, 1410 cm<sup>-1</sup>, 1320 cm<sup>-1</sup>, 1241 cm<sup>-1</sup>에서의 네 개의 피크는 heptazine 구조 내에 존재하는 C-N 및 C=N 결합의 stretching에 의해 발생된 것이다[11]. 또한 889 cm<sup>-1</sup>와 806 cm<sup>-1</sup>에서 나타나는 피크는 각각 heptazine(C<sub>6</sub>N<sub>7</sub>)과 s-triazine 고리의 bending 진동에 기인된다[11]. 이러한 결과들은 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 구조 내에 존재하는 작용기들을 잘 설명하므로 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매가 성공적으로 합성되었음을 알 수 있다. 그러나 알칼리 금속으로 도핑되지 않은 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매와 도핑된

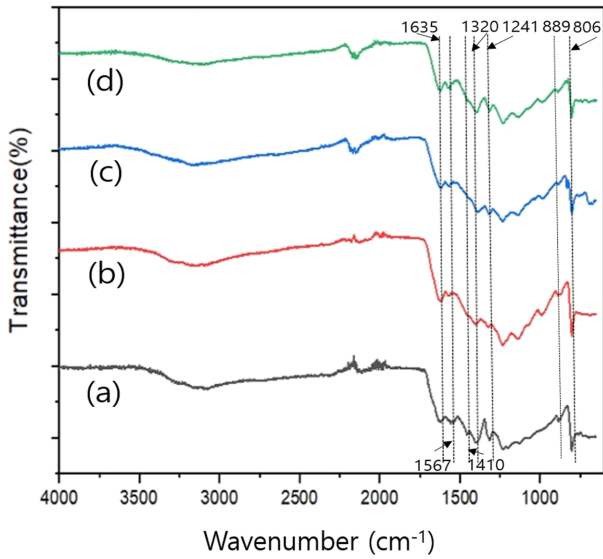


Fig. 3. FT-IR spectra of (a) undoped  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and  $M\text{-}g\text{-C}_3\text{N}_4$  doped with (b)  $\text{Li}^+$ , (c)  $\text{Na}^+$  and (d)  $\text{K}^+$  ions.

$M\text{-}g\text{-C}_3\text{N}_4$  광촉매들의 FT-IR 스펙트럼에 큰 차이가 나지 않았으며, 이는 알칼리 금속들의 도핑이  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  광촉매의 화학구조에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다.

### 3-2-2. XPS 분석

$g\text{-C}_3\text{N}_4$  광촉매의 표면 조성과 화학적 상태를 조사하기 위해 XPS 분석을 수행했으며, 그 결과를 Fig. 4로 나타내었다. Fig. 4(a)의 측량(survey) 스펙트럼에서 C, N, O 원소만이 존재함을 알 수 있다.  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 에서 C, N 및 O 원자 간의 화학적 결합을 추가로 관찰하기 위해 고해상도 C 1s, N 1s 및 O 1s 스펙트럼을 각각 Fig. 4(b), (c), (d)의 스펙트럼으로 나타내었다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이, 고해상도 C 1s 스펙트럼은 세 개의 주요 피크를 보여준다. 284.8 eV에서 중심이 되는 피크는 CN heterocycle 내의 흑연질 C-C에 기인되며, 286.2 eV에서 중심이 되는 피크는 C=O로 식별되며, 288.2 eV에서의 피크는 CN heterocycle 내의  $sp^2$  혼성화된 C 원자(N-C=N)에 해당된다[10]. Fig. 4(c)의 고해상도 N 1s 스펙트럼은 또한 각각 약 398.8 eV, 400.1 eV, 401.2 eV에서 중심이 되는 세 개의 스펙트럼으로 분해될 수 있다.

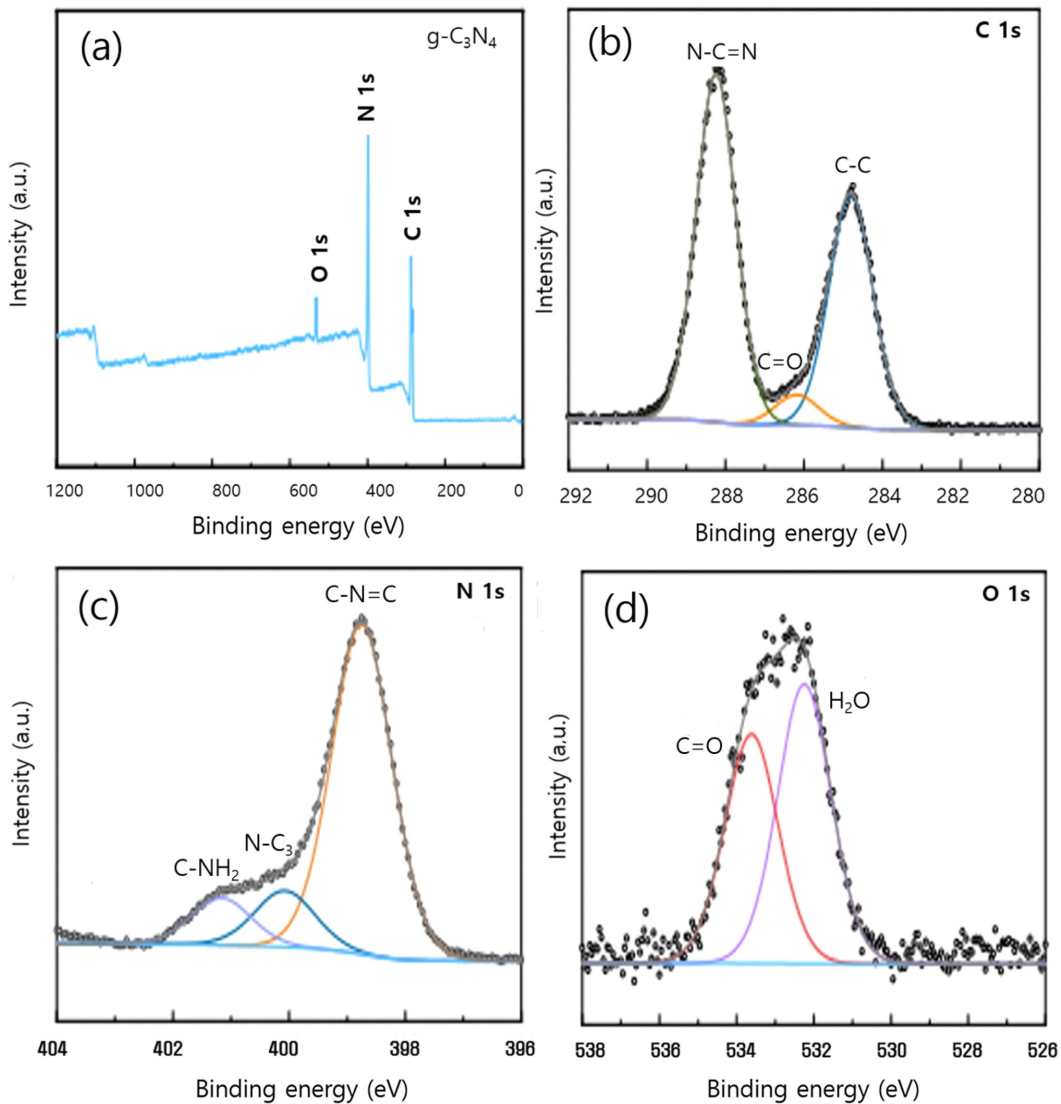


Fig. 4. XPS spectra of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ : (a) full scan, (b) C 1s, (c) N 1s and (d) O 1s.

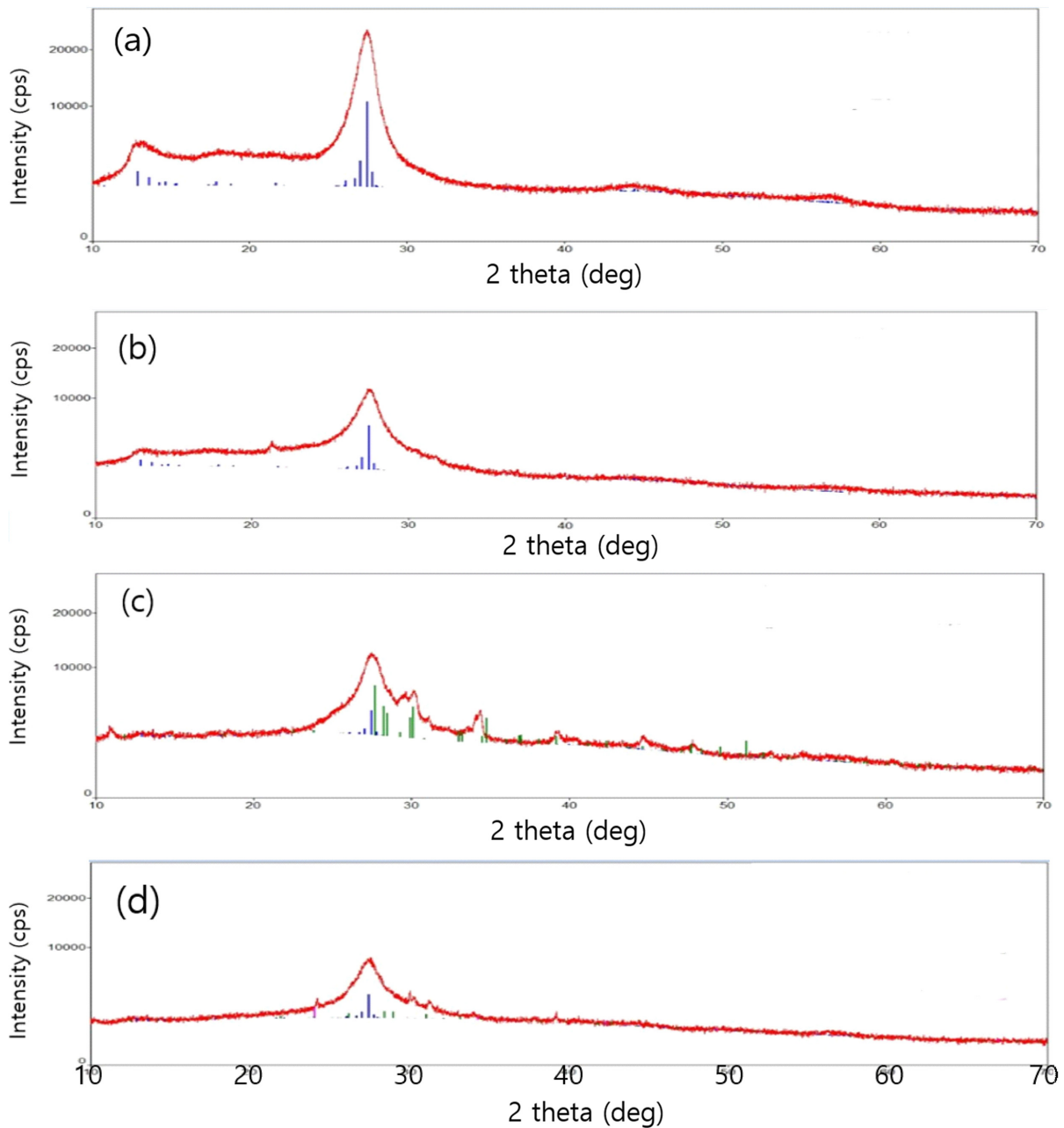


Fig. 5. XRD patterns of (a) undoped  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and  $M\text{-}g\text{-C}_3\text{N}_4$  doped with (b)  $\text{Li}^+$ , (c)  $\text{Na}^+$  and (d)  $\text{K}^+$  ions.

특히 398.8 eV에서의 피크는 triazine 고리 또는 heptazine 고리에 관여하는  $\text{C}=\text{N}-\text{C}$ 에 기인되며, 400.1 eV에서의 피크는 C 원자에 결합된 3차  $\text{N}(\text{N}-\text{C}_3)$ 에 기인된다. 또한 401.2 eV에서의 피크는 heptazine 고리의  $\text{sp}_3$  혼성화 말단  $\text{C}-\text{NH}_2$ 에 기인된다. 한편 Fig. 4(d)의 O 1s 스펙트럼은 결합 에너지가 531.3 eV와 533.6 eV인 두 개의 단일 피크로 분해될 수 있으며, 이는 각각 카보닐  $\text{C}=\text{O}$  그룹과 흡착된 물의 O 원자에 기인된다[12].

### 3-2-3. XRD 분석

순수한  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 와 알칼리 금속으로 도핑된  $M\text{-}g\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 결정성을 확인하기 위하여 XRD 분석을 수행해 Fig. 5로 나타내었다. Fig. 5(a)의 도핑되지 않은  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 XRD 패턴에서는 13.1°에서의 약한

회절 피크와 27.5°에서의 강한 피크의 두 개의 특징적인 피크가 관찰되었으며, 이러한 패턴은  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 육각 구조(hexagonal structure)가 잘 형성되었음을 의미하므로 결과적으로  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 가 성공적으로 잘 합성되었음을 알 수 있다[10]. 13.1°에서의 약한 피크는 질소와 연결된 tri-s-triazine(heptazine) 고리의 평면 내 구조적 반복 단위에 기인하며, d 값이 0.675 nm인 (100) 회절면에 해당한다[13]. 또한 27.5°에서의 강한 피크는 0.332 nm 거리의 공액 방향족(aromatic) segments의 층간 적층에 기인되었으며, 적층 방향족 시스템의 (002) 회절면에 해당한다[13]. 그러나 Fig. 5(b), 5(c), 5(d)의  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  이온으로 각각 도핑된 광촉매들의 13.1°와 27.5°에서의 회절 피크의 강도가 크게 약화되었으며, 이는 도핑된 금속 이온들이 결정 성장을 억제시켜  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 결정성을 감소시켰음을 의미한다.

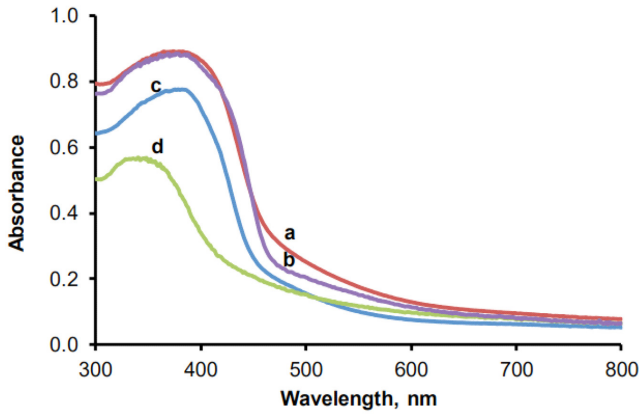


Fig. 6. UV-Visible spectra of (a)  $\text{Na}^+$  doped  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$ , (b)  $\text{K}^+$  doped  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$ , (c) undoped  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  and (d)  $\text{Li}^+$  doped  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$ .

3-2-4. UV-Vis spectrum 분석

다양한 알칼리 금속들이 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$ 와 도핑되지 않은  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  시료의 광흡수 특성을 Fig. 6의 UV-Vis spectrum으로 나타내었다. 광촉매들은 자외선과 가시광선 모두를 흡수하는 경향을 보이고 있다. Na와 K(Fig. 6의 a, b) 금속들의 도핑은 도핑되지 않은 시료(Fig. 6의 c)에 비해 흡광도 강도를 증가시키고 밴드 가장자리를

가시광선 범위로 이동시킨 것을 알 수 있다. 그러나 Li(Fig. 6의 d) 금속의 도입은 도핑되지 않은 시료에 비해 흡광도를 감소시키고 밴드 가장자리를 UV 범위로 이동시켰다. 이 결과는 Wen 등의 최근 연구의 결과[6]와 잘 일치한다.

3-2-5. 밴드갭 에너지 분석

도핑되지 않은 순수한  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  광촉매와 알칼리 금속이 2 wt%씩 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  광촉매의 광학적 밴드갭을 Kubelka-Munk 플롯(K-M 플롯)을 사용하여 계산하여 Fig. 7로 나타냈다. Fig. 7(a)의 순수한  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  시료는 2.80 eV의 밴드갭 에너지를 나타냈으며, Fig. 7(b)의 Li 금속으로 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  시료는 2.73 eV, Fig. 7(c)의 Na 금속으로 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  시료는 2.62 eV, Fig. 7(d)의 K 금속으로 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  시료는 2.56 eV의 밴드 갭을 나타내 순수한  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  시료보다는 알칼리 금속들이 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  광촉매들이 모두 밴드갭이 낮아졌다. 또한 알칼리 금속 중 K 금속을 사용 시 밴드갭 에너지가 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 밴드갭 에너지가 감소할수록 낮은 에너지의 광을 통해서도 광여기에 의해 광전자와 정공을 발생시킬 수 있으므로, 본 연구를 통해 개발된 알칼리 금속으로 도핑된  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  광촉매들은 효과적인 가시광선 광촉매로서 사용될 수 있다고 판단된다.

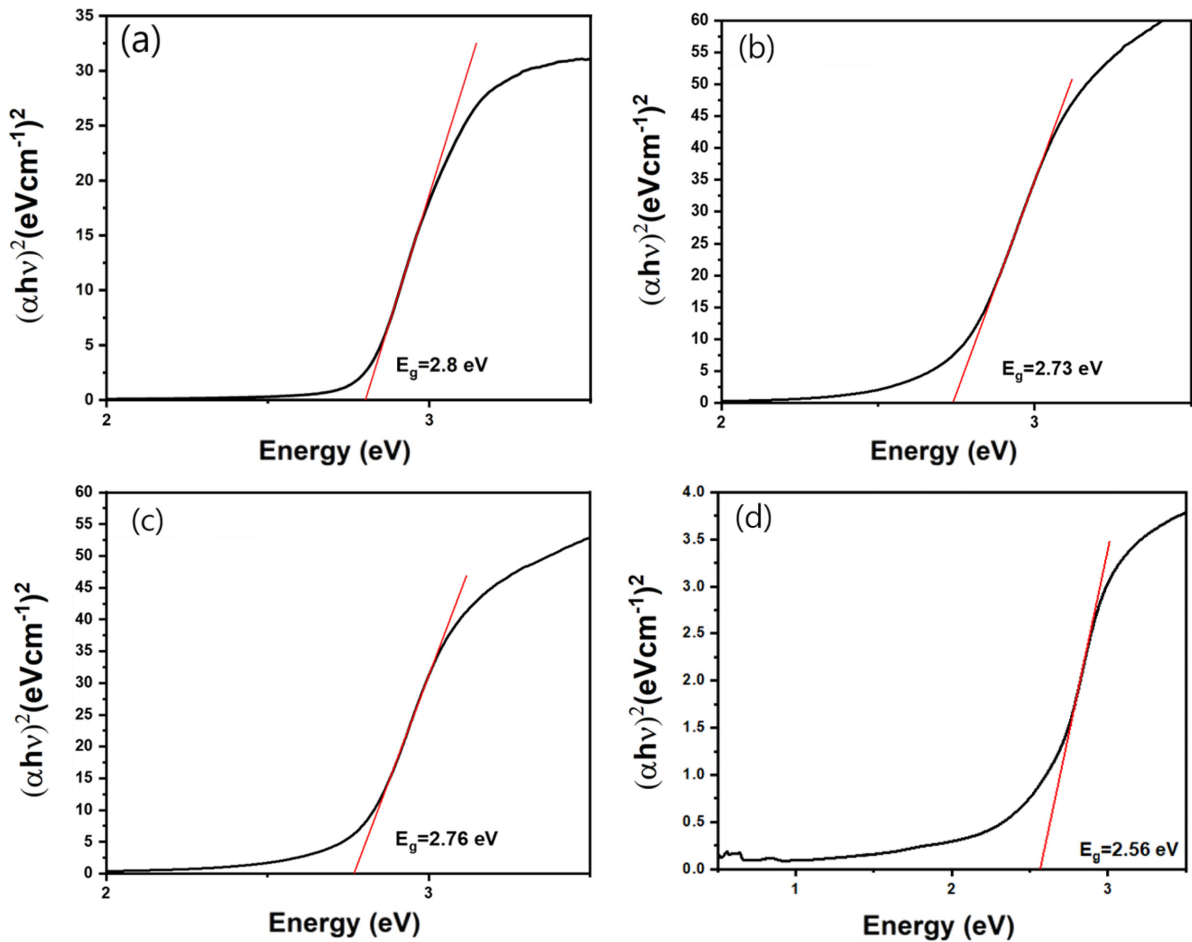


Fig. 7. Energy band gaps of (a) undoped  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  and  $\text{M-g-C}_3\text{N}_4$  doped with (b)  $\text{Li}^+$ , (c)  $\text{Na}^+$  and (d)  $\text{K}^+$  ions.

## 4. 결 론

본 연구에서는 melamine을 고온에서 하소시켜 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매를 제조한 후 이를 알칼리 금속(Li, Na, K)으로 도핑시켜 알칼리 금속이 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매를 합성하였다. 합성된 광촉매들의 특성은 FT-IR, XPS, XRD, UV-Vis spectrometer를 사용하여 분석하였다. XRD 분석에서 27.5°에서의 피크를 확인하였고, 이 결과로부터 성공적으로 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매가 합성되었음을 알 수 있다. 그러나 Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> 이온으로 각각 도핑된 광촉매들의 13.1°와 27.5°에서의 회절 피크의 강도가 크게 약화되었으며, 이는 도핑된 금속 이온들이 결정 성장을 억제시켜 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 결정성을 감소시킴을 의미한다. 순수한 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 시료는 2.80 eV의 밴드갭 에너지를 나타냈으며, Li 금속으로 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 시료는 2.73 eV, Na 금속으로 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 시료는 2.76 eV, K 금속으로 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 시료는 2.56 eV의 밴드갭을 나타내 순수한 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 시료보다는 알칼리 금속이 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매들이 모두 밴드갭이 낮아졌다. 또한 알칼리 금속 중 K를 도핑 시 밴드갭 에너지가 가장 낮아지는 것을 알 수 있었다. 밴드갭 에너지가 감소할수록 낮은 에너지의 광을 통해서도 광여기에 의해 광전자와 정공을 발생시킬 수 있으므로, 본 연구를 통해 개발된 알칼리 금속으로 도핑된 M-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 광촉매들은 효과적인 가시광선 광촉매로서 사용될 수 있다고 판단된다.

## 감 사

본 연구는 한국산업기술진흥원의 2025소재부품 산업기술개발 기반기술(R&D)의 양산성능평가 사업의 지원으로 이뤄진 것으로서, 다양한 성과 획득에 도움이 되었고, 연구지원을 받아 수행된 결과물로서 연구 지원하여 주심에 감사드립니다.

## References

1. Wang, X., Maeda, K., Thomas, A., Takanabe, K., Xin, G., Carlsson, J. M., Domen, K. and Antonietti, M., "A Metal-Free Polymeric Photocatalyst for Hydrogen Production from Water under Visible Light," *Nature Materials*, **8**, 76-80(2009).
2. Soltani T. and Entezari, M. H., "Sono-Synthesis of Bismuth Ferrite Nanoparticles with High Photocatalytic Activity in Degradation of Rhodamine B under Solar Light Irradiation," *Chemical Engineering Journal*, **223**, 145-154(2013).
3. Kim, D. W., Kim, E. J. and Moon, K. S., "Characteristics and Applications of Graphitic Carbon Nitride Nanocomposite," *Ceramist*, **27**(2), 123-144(2024).
4. Yang, J., Wang, D., Han, H. and Li, C., "Roles of Cocatalysts in Photocatalysis and Photoelectrocatalysis," *Accounts of Chemical*

*Research*, **46**(8), 1900-1909(2013).

5. Wudil, Y. S., Ahmad, U. F., Gondal, M. A., Al-Osta, M. A., Almohammed, A., Sa'id, R. S., Hrahsheh, F., Haruna, K. and Mohamed, M. J. S., "Tuning of Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) for Photocatalysis: A Critical Review," *Arabian Journal of Chemistry*, **16**, 104542(2023).
6. Wen., J., Xie, J., Chen, X. and Li, X., "A Review on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Photocatalysts," *Applied Surface Science*, **391**, 72-123(2017).
7. HariPriya, P., Anjana, T., Sreelakshmi, K., Madhu, N. T., Anjana, M., Suneesh, P. V. and Kuma, D. V. R., "Effect of Alkali Metal Cation Doping in Graphitic Carbon Nitride towards Photocatalytic Generation of Hydrogen Peroxide under Direct Sunlight," *Catalysis Communications*, **187**, 106909(2024).
8. Sakthivel, S. and Kisch, H., "Daylight Photocatalysis by Carbon-Modified Titanium Dioxide," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **42**, 4908-4911(2003).
9. Kim, Y., Lee, T., Park, J. and Kwon, E. E., "Fabrication of Oxygen-Functionalized Graphitic Carbon Nitride and Its Photocatalytic Removal of Gaseous Toluene," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **41**(5), 874-886(2025).
10. Wu, M., Zhang, J., He, B. B., Wang H. W., Wang, R. and Gong, Y. S., "In-Situ Construction of Coral-Like Porous P-Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Tubes with Hybrid 1D/2D Architecture and High Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution," *Applied Catalysis B: Environmental*, **241**, 159-166(2019).
11. Li, K., Xie, X. and Zhang, W. D., "Porous Graphitic Carbon Nitride Derived from Melamine-Ammonium Oxalate Stacking Sheets with Excellent Photocatalytic Hydrogen Evolution Activity," *Chem-CatChem*, **8**, 2128-2135(2016).
12. Huang, Y., Ding, T., Zuo, W., Nie, Z., Zheng, M. and Zeng, Y., "Tunable Nitrogen Vacancies on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for Efficient Photocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction and H<sub>2</sub> Production," *Environmental Research*, **274**, 121302(2025).
13. Jiang, J., Cao, S., Hu, C. and Chen, C., "A Comparison Study of Alkali Metal-Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for Visible-Light Photocatalytic Hydrogen Evolution," *Chinese Journal of Catalysis*, **38**, 1981-1989(2017).

## Authors

**Suk Hwan Kang:** CEO(Chief Executive Officer), Uniplatek Co. 105 Shinildong-ro, Daeduck-gu, Daejeon 34324, Korea; expo91@hanmail.net  
**Young Gu Cheun:** Principle Researcher, Uniplatek Co. 105 Shinildong-ro, Daeduck-gu, Daejeon 34324, Korea; ygcheun1@naver.com  
**Ki Chang Song:** Professor, Department of Biomedical Materials, Konyang University, 158 Gwanjeodong-ro, Seo-gu, Daejeon 35365, Korea; songkc@konyang.ac.kr