



## 인류의 삶에 가장 중요한 화학반응: 암모니아 합성

백종범\*

### Most Important Chemical Reaction in Human Life: Ammonia Synthesis

Jong-Beom Baek\*

---

#### ABSTRACT

There are thousands of chemical reactions in our daily life from breathing air to driving car. Although there should be a list of important chemical reactions, including ammonia synthesis, urea synthesis, ethylene polymerization, hydrogen combustion, metal redox reaction, water-carbon dioxide reaction, fermentation, Maillard reaction, saponification, polymerase chain reaction, and so on, the most important chemical reaction that human discovered and contributed to humanity should be ammonia synthesis. It is because ammonia saved the world once and it might do it again. After discussing the important contributions of ammonia syntheses first, remaining challenges for new ammonia synthesis, which may save the world once again, are introduced to hand the clean planet over next generations.

Key words: Ammonia synthesis, Haber-Bosch process, Mechanochemical process, Hydrogen carrier, Hydrogen storage and transportation

---

\* 울산과학기술원, 2023년 대한민국학술원상 자연과학응용 부문 수상자

## 초 록

숨쉬기부터 자동차를 운전해 이르기까지, 수많은 화학반응들이 우리의 일상에서 일어나고 있다. 예를 들면, 암모니아 합성, 요소합성, 에틸렌중합, 수소연소, 금속의 산화-환원 반응, 물-이산화탄소 반응, 발효, 메이라드 반응, 비누화 반응 및 고분자 연쇄반응, 등이다. 물론, 보는 시각에 따라서 논쟁의 여지가 있지만, 인간이 발견하고 인류의 삶에 중요한 영향을 끼친 화학반응들 중 가장 중요한 것이 암모니아 합성이다. 왜냐하면, 암모니아는 인류를 한번 구원했고, 다시한번 더 구원할 것이다. 지금까지 암모니아의 중요한 기여를 먼저 논하고, 우리 후손에게 보다 살기 좋은 지구를 물려주기 위해 암모니아의 새로운 도전에 대해서 논하고자 한다.

주제어: 암모니아, 하버-보슈법, 기계화학법, 수소저장체, 수소저장 수송

---

### 목 차

I. 서론	4. 수소경제와 암모니아
1. 암모니아의 중요성	5. 중앙집중형과 분산형 암모니아 합성법
2. 하버-보슈 암모니아 합성법	6. 새로운 기계화학 암모니아 합성법
II. 본론	7. 기계화학 암모니아 합성법의 한계
1. 인공적인 암모니아 합성과 인류의 삶	8. 기계화학 암모니아 합성법의 도전
2. 화석연료와 지구온난화	III. 결론
3. 지구온난화와 수소경제	

---

## I. 서론

### 1. 암모니아의 중요성

우리가 학창시절 실과 시간에 배운 식물의 3대 영양소, 즉, 질소 인산 칼슘 중, 인산과 칼슘은 식물이 뿌리를 통해서 원활하게 영양을 공급받을 수 있었지만, 퇴비(거름)로부터 질소를 공급받는 속도는 매우 느려, 식물의 성장 속도에 큰 영향을 주었다. 자연에서는 번개 칠 때 공기중의 질소와 물이 분해되어 암모니아가 합성되거나, 식물의 뿌리(특히, 콩과식물)에서 공생하고 있는 질소고정 박테리아

인류의 삶에 가장 중요한 화학반응: 암모니아 합성

(nitrogenase)가 생물학적 촉매로 질소와 물을 반응시켜 암모니아를 합성하는 정도로 자연에만 있는 것으로 알려져 있었다.

## 2. 하버-보슈 암모니아 합성법

1909년에 독일의 과학자 하버(Fritz Haber)가 최초로 철 촉매를 이용하여 공기중의 약 78%를 차지하는 질소와 수소를 고온 고압에서 반응시켜 인공적으로 암모니아를 합성하는데 성공하였다. 이 공로으로 하버는 1918년 노벨 화학상을 수상하였다.

독일의 화학기업 BASF(Badische Anilin- & Soda Fabrik)의 과학자 보슈(Carl Bosch)가 실험실 규모에서 성공한 암모니아 합성법을 대량생산하는데 성공하여 상업화가 되었다. 이 공로로 보슈는 1931년도에 노벨 화학상의 수상하게 되었다. 이렇게 합성된 암모니아는 인공적으로 생산하는 화합물 중 황산에 이어 세계에서 두번째 많이 생산되고 있다. 하버-보슈법(Haber-Bosch)은 고온-고압 조건에서 암모니아를 생산하며, 대부분은 식물의 3대 영양소 중 하나인 질소를 공급하기 위해 요소(urea)비료 생산하는데 사용되고 있다.

## II. 본론

### 1. 인공적인 암모니아 합성과 인류의 삶

암모니아 합성법이 인류의 삶에 가장 큰 기여를 했다고 여기는 이유는 인류를 기근에서 해방시켰기 때문이다. 1914년 1차 세계대전 직전인 20세기 초반의 세계인구는 약 17억명이었다. 약 100년 후 오늘날의 세계인구는 약 72억명으로 4배 이상 증가하였다. 하지만, 20세기 초반에 기근으로 굶어 죽는 사람의 숫자가 훨씬 많았다고 한다. 그 이유는 인구의 증가 속도를 곡물의 생산량이 따라갈 수 없었다. 공기중에 무한한 원료인 질소를 이용하여 인공적으로 암모니아를 합성하여 인공비료로 농작물에 공급하여 곡물의 생산량 증가를 이뤄낼 수 있었다. 그 결과 암모니아가 인류를 기근에서 구원했기 때문에 암모니아 합성법이 인간이 발명한

가장 중요한 화학 반응 중의 하나로 자리매김했다.

## 2. 화석연료와 지구온난화

21세기에 살고 있는 인류가 직면한 현재의 가장 큰 위기는 에너지 문제이다. 18세기 중반에서 19세기 초반까지 이뤄진 산업혁명을 시작으로 인류는 많은 에너지가 필요하였고 화석연료로부터 에너지를 추출하여 산업을 발달시켜왔다. 화석연료는 탄소를 기반으로 하는 화합물로, 화학결합으로 저장되어 있는 에너지를 뽑아 쓰고, 부산물로 발생하는 이산화탄소를 공기중으로 배출하게 된다. 이렇게 배출된 이산화탄소는 지구온난화의 주범이 되었고 지구는 점점 뜨거워지고 있다.

산업의 발달로 더 많은 화석연료가 필요하고, 더 많은 이산화탄소가 대기 중으로 배출되어, 인류가 배출하는 이산화탄소의 양이 자연에서 충분히 흡수하여 균형을 이루는 탄소중립은 균형을 잃어, 지구는 이미 데워지고 있다. 어린 시절 조상들이 사용해온 구들장으로 만든 겨울철 난방을 생각해보면, 초저녁에 불을 한번 지피고 나면 새벽까지 따뜻한 것처럼, 현재 우리가 직면한 지구온난화의 심각성을 알 수 있다. 데워지지 시작한 지구를 식히는 노력이 이미 늦었지만, 후손들이 살 만한 지구를 물려주기 위해서는 지금이라도 이산화탄소를 배출하지 않는 혹은 적게 배출하는 재생에너지 개발을 하지 않으면 지구에서 인류가 살 수 있는 땅은 점점 줄어들 것이다. 따라서, 우리는 탄소경제를 바탕으로 산업발달을 해왔지만, 동시에 살기 힘든 지구를 만들고 있다. 이산화탄소배출이 없는 수소경제를 활성화하여 다음세대에 물려주어야 할 의무가 있다.

## 3. 지구온난화와 수소경제

튼금없이 암모니아 합성법에서 지구온난화를 언급하는 것은 무엇일까? 암모니아가 지난 100여년간 인류를 기근에서 해방시켰다. 앞으로 지구온난화문제 해결에 어떤 역할을 할까?

화석연료의 역할을 상당부분 대신할 수 있는, 즉 이산화탄소를 배출하지 않거나 적게 배출하는 재생에너지를 개발하여야 한다. 예를 들면, 태양광, 풍력, 수력 등, 재생에너지를 이용하여 전기에너지를 얻는다. 하지만 전기는 우유와 같이 오래 보관하기 힘들다. 오늘 만든 전기를 보관하여 며칠 후 사용할 수 없다. 우유를 치

인류의 삶에 가장 중요한 화학반응: 암모니아 합성

스로 만들어 오래 보관하는 것처럼, 전기를 치즈처럼 저장해야 오래 보관하며 필요할 때 사용할 수 있다. 여러가지 전기를 저장하는 방법이 있다. 대표적으로 배터리를 이용한 에너지저장시스템(energy storage system) 혹은 전기를 이용하여 물을 분해하면 수소(hydrogen)로 에너지를 저장할 수 있다. 에너지저장시스템은 자체 무게 때문에 수송이 곤란한 단점이 있어 고정된 장소에 저장하는 목적으로 유리하다. 여기에서 수소는 수송 및 저장이 모두 가능해 탄소경제를 대체할 새로운 수소경제란 용어가 사용된다.

#### 4. 수소경제와 암모니아

수소경제란? 재생에너지를 수소의 형태로 저장하여, 화석연료, 즉 탄소경제의 역할을 하게 하는 것이다. 수소는 화석연료에서도 얻을 수 있지만, 이산화탄소를 부산물로 배출하기 때문에 회색수소로 구분하며, 지구온난화 문제를 해결하는데 도움이 되지 않는다. 화석연료의 석유나 석탄을 필요한 곳으로 운반하듯이, 재생에너지를 저장한 물에서 얻은 그린수소를 운반하는 문제가 남아 있다.

수소는 가장 작고 가벼운 분자이다. 많은 양을 효과적으로 운반하기 위해 수소기체를 액화시켜야 하는데 비용이 많이 든다, 또한, 수소는 가장 작은 분자여서 어떠한 용기의 재질을 사용하더라도 용기벽을 통과하여 새어 나가는 특징이 있어 장기간 보관할 때 손실이 발생한다. 탄소경제를 대신할 수소경제(즉 재생에너지 ↔수소생산↔수소수송 저장↔수소활용)를 활성화하여 지구 온난화 문제를 해결하는데 가장 걸림돌이 되는 과학 기술적인 한계가 수소수송 저장이다.

수소의 수송 및 저장문제의 해결사로 암모니아가 다시한번 주목을 받고 있다. 그 이유는 암모니아가 수소저장체로 가장 효율이 좋기 때문이다 (그림 1). 암모니아는 쉽게 액화가 가능하며, 단위 부피당 압축가스수소 및 액화수소보다 1-6배 많은 양을 운송할 수 있다. 수소를 암모니아로 전환 및 암모니아를 분해하여 수소로 환원할 때 추가적인 비용이 발생하지만, 압축수소가스나 액화수소로 수송할 때 비효율성을 감안하면 훨씬 경제적이다. 또한, 암모니아로부터 수소로 환원할 때 질소를 부산물로 배출하기 때문에 환경에도 영향을 주지 않는다.

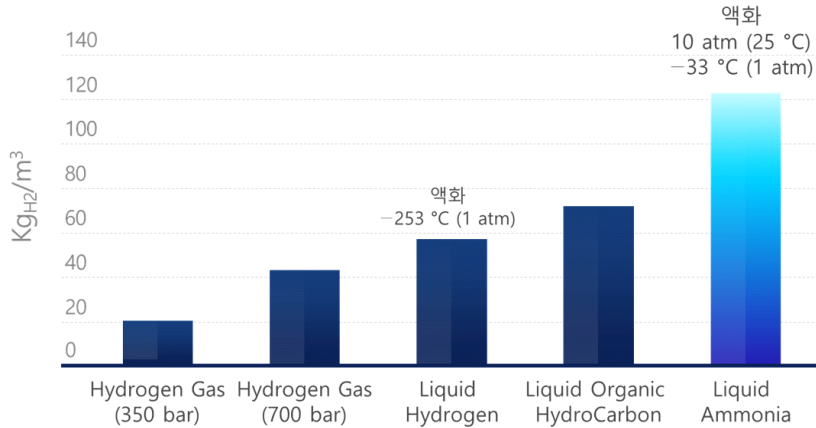


그림 1. 수소운반매체 별 단위부피당 수소저장효율 비교.

### 5. 중앙집중형과 분산형 암모니아 합성법

지난 110년간 인류를 먹여 살려온 하버-보슈법으로 생산된 암모니아가 수소경제에서 가장 어려운 수소수송 저장 문제를 해결할 구원투수가 될 수 있을까? 여기서 중앙집중형(centralized) 및 분산형(decentralized) 암모니아생산에 대해서 알아보자.

하버-보슈 암모니아 합성법은 고온-고압조건에서 질소와 수소를 반응시켜 암모니아를 합성하며 두단계의 공정으로 구성되어 있다(그림 2). 그 첫 단계가 메탄(CH<sub>4</sub>)을 물(H<sub>2</sub>O)과 고온-고압에서 찌서 이산화탄소를 부산물로 배출하고 회색수소를 얻는다. 두번째 단계가 공기중에서 분리한 질소와 회색수소를 고온-고압반응기에서 반응시켜 암모니아를 생산한다. 그 결과 하버-보슈법으로 생산한 암모니아는 회색암모니아로 분류하며, 첫 단계를 그린수소로 대체하지 않으면 수소경제 활성화에 기여할 수 없다(그림3a).

또한, 하버-보슈법은 안전시설을 갖춘 초대형 공장에서 암모니아를 생산해야 경제성이 있다. 즉 중앙집중형이다. 공장이 크면 클수록 암모니아를 값싸게 생산할 수 있어 가격경쟁력을 가진다. 암모니아가 필요한 곳으로 수송하는 비용까지 고려하면, 내수시장이 충분히 큰 나라에서 암모니아를 생산해야 경제성이 확보된다. 이러한 이유로 우리나라에는 암모니아 생산공장이 없으며, 거의 100% 수입에 의존한다.

인류의 삶에 가장 중요한 화학반응: 암모니아 합성

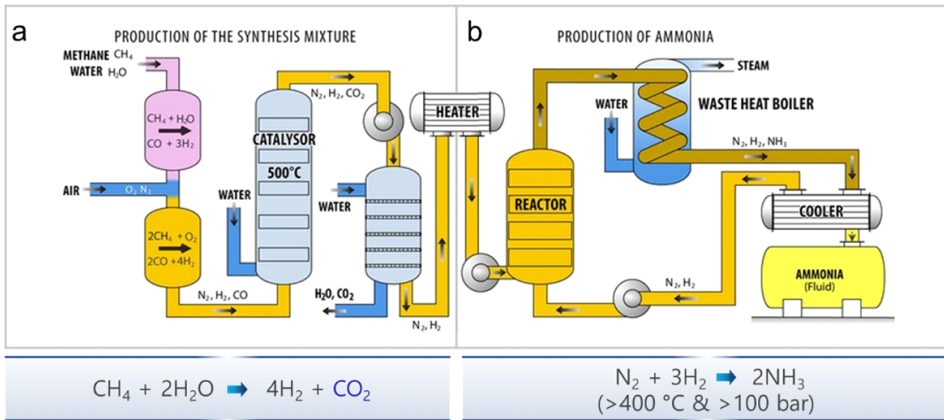


그림 2. 하버-보슈 암모니아합성 공정도. (a) 메탄-물 분해공정, (b) 고온-고압 암모니아 합성공정 (출처: Wikipedia).

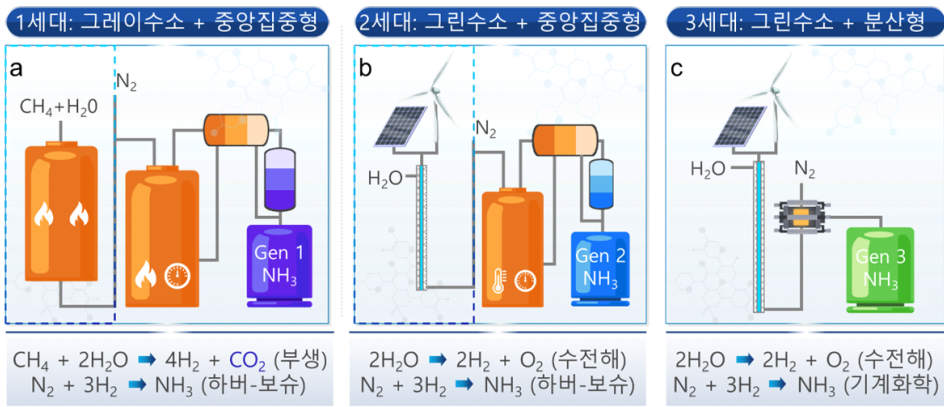


그림 3. 공정에 따른 세대별 암모니아 합성법. (a) 1세대 중앙집중형 그레이암모니아 합성공정, (b) 2세대 중앙집중형 그린암모니아 합성공정, (c) 3세대 분산형 그린암모니아 합성공정 (출처: 저자).

중앙집중형은 재생에너지 발전단지에서 대형 암모니아 생산공장으로 송전을 하여 그린수소를 생산하고(그림 3b), 질소와 반응하여 생산된 암모니아를 다시 필요한 곳으로 운반해야 하는 문제가 발생한다. 수소경제활성화에서 가장 많은 비용이 드는 수소수송 저장문제를 해결하는데 중앙집중형은 맞지 않다. 따라서, 재생에너지 발전단지에서 물을 전기 분해하여 생산된 그린수소를 이용하여 현장 (on-site)에 바로 연결하여 암모니아를 생산할 수 있는 분산형 합성법이 개발되어야 수소경제활성화에 기여를 할 수 있다(그림 3c). 분산형 합성법으로 생산된 그린암모니아가 다시한번 인류가 직면한 지구온난화 문제를 해결할 구원투수가 될 수 있다고 본다.

## 6. 새로운 기계화학 암모니아 합성법

전통적으로 화학반응을 유도하기 위해 열, 빛, 전기 등을 사용해 왔다. 이들을 각각 열화학(thermochemistry), 광화학(photochemistry), 전기화학(electrochemistry)로 불린다. 지난 110여년간 사용되어온 하버-보슈법은 열화학에 해당된다. 앞서 언급한 것처럼, 최근에 수소경제활성화에 기여하기 위해 학계에서는 중앙집중형 하버-보슈법을 대체할 분산형 암모니아 합성법을 찾고 있다. 열화학을 대체할 빛을 이용하는 광화학 및 전기를 이용하는 전기화학 암모니아 합성법 개발이 매우 활발하다. 하지만, 광화학 및 전기화학은 질소와 수소를 액체 전해질에 녹여 화학반응을 유도해야 하는데, 용해도가 매우 낮아 반응 효율이 열화학에 크게 미치지 못한다.

열화학, 광화학, 전기화학에 이어 기계화학(mechanochemistry)이 큰 주목을 받고 있다. 기계화학은 마찰, 충격, 운동에너지 등을 이용하여 화학반응을 유도하기 때문에 온도의 영향을 거의 받지 않으며, 전통화학에서 불가능했던 반응도 가능할 수도 있다. 또한, 전통화학에서 에너지전달을 효율적으로 하기위해서 사용하는 오염을 유발하는 액체 매질(용매)도 사용하지 않아 매우 친환경적이다.

2021년, 기계화학을 이용하여 상온-상압에서 암모니아를 합성하는데 성공하여, 기계화학 암모니아 합성법이 주목을 받고 있다.(참고문헌 1) 이 방법은 쇠구슬을 기계적으로 흔들여 충분한 운동에너지를 발생시킬 수 있는 장치에서 철 촉매를 사용하여 질소와 수소를 반응시켜 암모니아를 합성하는 방법이다. 지난 110여년간 최적화를 거듭해온 하버-보슈법의 수율이 약 25%인데 비해 기계화학 암모니아 합성법은 약 82%이다. 상온-상압에서 암모니아 합성이 가능하고 다양한 규모로 생산이 가능해 수소경제활성화에 기여할 수 있는 분산형 암모니아 합성법으로 주목을 받고 있다.

## 7. 기계화학 암모니아 합성법의 한계

- (1) 새로 개발된 기계화학 합성법은 반응효율 면에서, 하버-보슈법을 압도하고 있다. 하지만, 하버가 1909년도 암모니아 합성법을 처음 개발했을 당시, 수율이 매우 낮았지만, 질소와 수소혼합가스를 사용하고, 응축하기 쉬운 암모니아를 분리한 후 혼합가스를 재순환시켜 사용할 수 있는 연속공정으로



1918년 보슈에 의해 상업화가 가능하였다. 2021년에 최초로 개발된 기계 화학 암모니아 합성법은 수율은 매우 높지만, 배치(batch)공정으로 연속적인 생산에 한계가 있다. 대량생산을 위해서는 연속공정 개발이 필수이다. 이를 위해서 해결해야 하는 기술적인 문제는 (1) 두 단계 반응(질소분해-수소와 반응→암모니아 생산)을 한단계반응(질소/수소혼합가스→암모니아 생산)으로 간소화, (2) 반응시간 단축, (3) 낮은 운동에너지사용, (4) 연속공정 반응기 개발, 등이 있다.

- (2) 시간이 돈이라는 말이 있는 것처럼, 산업 경쟁력은 시간당 생산량이다. 기계화학 암모니아 합성법은 한번 반응의 효율은 높지만, 반응시간이 오래 걸려 단축이 필요하다. 또한, 적은 규모의 반응기에서 빠른 회전을 통한 충분한 운동에너지를 발생시켜 암모니아를 합성할 수 있지만, 대규모 반응기를 사용할 경우, 빠른 회전속도를 내기가 어렵다. 이 두가지 문제를 해결하기 위해서는 보다 효과적으로 반응을 유도해야 한다. 우리가 감기에 걸려 몸 상태가 좋지 않을 경우, 몸의 활기를 불어넣기 위해 병원에서 비타민 수액을 맞는 것처럼, 화학 반응에서도 적당한 촉진제(promoter)를 찾으면 이 두가지 문제를 동시에 해결할 수 있다.

## 8. 기계화학 암모니아 합성법의 도전

- (1) 하버-보슈 및 기계화학 암모니아 합성법 모두 철을 촉매로 사용한다. 안정한 질소를 철표면에 접촉시켜 효율적으로 분해하기 위해서는 철의 전자 밀도가 높은 것이 유리하다. 철의 전자밀도를 높이기 위해 전자를 쉽게 줄 수 있는 알칼리금속을 첨가하면, 철의 촉매효과가 향상된다고 알려져 있다. 하지만, 하버-보슈법은 고온공정으로 용점이 낮은 알칼리금속을 사용하면, 알칼리금속(예, K)이 액화 및 휘발이 되어 촉진제효과가 떨어진다. 이를 보완하기 위해 용점이 높은 알칼리산화물(예,  $K_2O$ )을 사용하기 때문에 산소가 포함된 화합물은 이론적으로 촉진제효과가 떨어진다.
- (2) 반면, 기계화학법은 저온반응으로, 산소가 포함되지 않은 순수한 알칼리금속(예, K)을 사용할 수 있어 촉진제효과를 최대화할 수 있다.(참고문헌 2) 그 결과, 반응시간을 혁신적으로 줄일 수 있고(그림 4a), 장치의 회전속도도 크게 줄일 수 있었다(그림 4b).

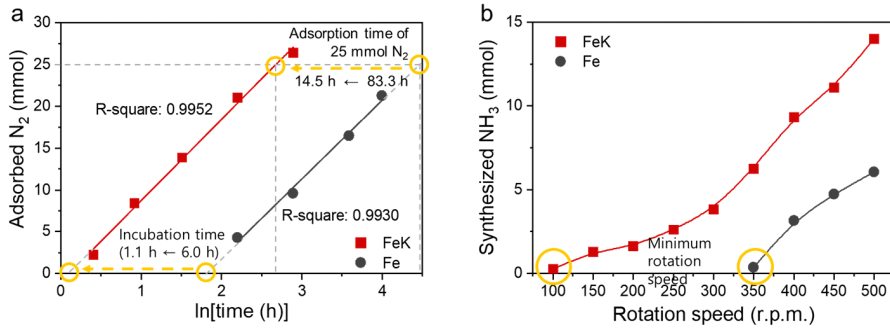


그림 4. 칼륨(K) 촉진제의 기계화학적 암모니아 합성의 촉진효과. (a) 반응시간이 단축, (b) 낮은 운동에너지에서 반응 (출처: Nature Communications 2023, 14, 2319).

(3) 상업화를 위해서는 연속공정개발이 필수적이다. 연속공정개발을 위해서는 반응기의 낮은 회전속도가 가장 중요하다. 이 경우 다양한 회전 반응기를 사용할 수 있다. 연속공정설계의 방안은: (i) 두 단계 반응을 한단계반응으로 대체하지 못할 경우 자동차 엔진처럼, 반응기 흡기구를 통해 질소를 주입하여 먼저 분해하고, 배기구를 통해 남은 질소를 뽑아내고, 수소를 주입하여, 암모니아를 합성하는 반 연속 공정개발 (그림 5a), (ii) 기다란 원통형 반응기에서 촉매화 질소를 먼저 반응시키고, 반응기의 교반 패들로 다음 반응기에 밀어 보내고 수소를 주입하여 암모니아를 합성하는 방법 등을 설계할 수 있다(그림 5b). 보슈가 암모니아 상업화에 기여한 것처럼, 21세기 한국판 보슈를 기다린다.

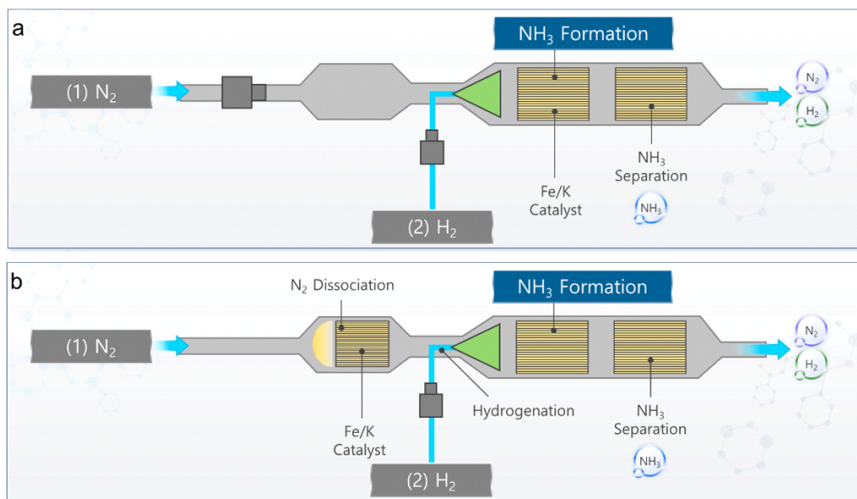


그림 5. 기계화학적 암모니아 생산공법 설계. (1) 자동차 엔진형 반 연속반응기, (b) 시출형 연속반응기 (출처: 저자).

### III. 결론

지난 100여년간 암모니아는 인류를 먹여 살려왔다. 앞으로 또 한 번의 인류위기를 암모니아가 구원해 줄 것을 믿으며 많은 도전적인 연구가 필요하다. 궁극적으로 지구에 가장 많은 원료는 공기중(기체)에는 질소, 지표면에는 물(액체) 및 규소(고체)가 있다. 공해를 유발하지 않고 지구의 무한한 자원을 원료로 인류가 필요한 물질을 만들어 사용하고 자연으로 되돌릴 경우 후손에게 깨끗한 지구를 물려줄 수 있다. 특히, 수소경제 활성화를 위해서 꼭 필요한 암모니아를 지구에 풍부한 질소와 물을 원료로 바로 생산할 수 있으면 인류의 식량 및 에너지 문제 해결에 가장 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- Han, *et al.* Mechanochemistry for ammonia synthesis under mild conditions. Nature Nanotechnology 2021, 16, 325.
- Kim, *et al.* Achieving volatile potassium promoted ammonia synthesis via mechanochemistry. Nature Communications 2023, 14, 2319.