

## 연료전지 UAV를 위한 고체 상태 $\text{NaBH}_4$ 수소 발생 및 공급 시스템의 특성 연구

이충준\*, 김태규\*\*

### The study on characteristics of solid-state $\text{NaBH}_4$ hydrogen generation and supply system for fuel cell UAV

Chung Jun Lee\* and Taegy Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes characteristics of solid-state  $\text{NaBH}_4$  hydrogen generation and supply system for fuel cell UAV. Flow rate and pressure of the generated hydrogen were dramatically changed during  $\text{NaBH}_4$  decomposition using acid. Hydrogen supply was stabilized by a self-pressurized reactor, and hydrogen stabilization method was introduced. For hydrogen generation in below zero-temperature, hydrochloric acid was diluted by propylene glycol-water mixtures. Solid-state  $\text{NaBH}_4$  hydrogen generation and supply system was designed. Basic operation experiments was performed to reveal the characteristics of this hydrogen generation system.

#### 초 록

본 논문은 연료전지 UAV를 위한 고체 상태의  $\text{NaBH}_4$  수소 발생 및 공급 시스템의 특성에 대해 기술하고 있다. 산을 이용하여  $\text{NaBH}_4$ 를 분해할 경우, 발생된 수소의 유량과 압력은 급격히 변화하게 된다. 공급 수소는 자체 가압식 반응기로 안정화 되었고, 수소의 안정화 방법에 대해 소개하였다. 영하조건에서 수소를 발생시키기 위해 묽은 염산을 프로필렌 글리콜 혼합 용액으로 희석하였다. 고체 상태  $\text{NaBH}_4$  수소 발생 및 공급 시스템을 설계하였다. 수소 발생 시스템의 특성을 밝혀내기 위한 기본 구동 실험을 수행하였다.

**Key Words** : Fuel Cell Aircraft(연료전지 항공기), Solid State  $\text{NaBH}_4$ (고체상태  $\text{NaBH}_4$ ), Anti-Freeze(빙결 방지), Hydrogen Generation System(수소 발생 시스템)

#### 1. 서 론

최근 무인항공기가 항공전장과 항공분야의 핵심 전력으로 주목받고 있다. 이 배경에는 5세대

전투기의 개발 및 배치의 지연과 무인항공기와 관련된 기술개발 속도가 당초에 예상했던 것보다 빠르게 진행된 것을 들 수 있으며, 전장과 같은 실제 환경에서 성공적인 임무 수행 사례들을 통한 가능성 발견으로 보다 가속화되고 있다.

무인항공기는 기존의 항공기가 가지고 있는 조종사의 신체적 한계로 인해 발생하는 제약에서 자유롭기 때문에 최근 임무 수행 능력 향상을 위해 연료전지를 이용한 장시간 체공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이를 보다 구체적으

† 2012년 7월 19일 접수 ~ 2012년 9월 21일 심사완료

\* 정회원, 조선대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : taegy@chosun.ac.kr

광주광역시 동구 서석동 375번지

로 살펴보면, 지난 2009년 싱가포르에서 무인항공기를 대상으로 약 8시간급 상용 연료전지 전력 공급 시스템이 출시되었으며, 같은 해 11월, 미해군은 연료전지 무인기 Ion Tiger가 중간 연료 재보급 없이 26시간 연속 비행에 성공한 바 있다. 국내에서도 이러한 움직임에 발맞추어 지난 2007년 KAIST에서 연료전지 무인기 개발에 성공한 바 있으며, 2011년에는 재료연구소에서 자체 개발한 연료전지를 적용한 무인항공기의 비행에 성공하였다.[1-4]

이와 같은 연료전지 무인기에 대한 관심이 증가하고 있는 이유는 연료전지는 기존의 연소 기관과 달리 화학적 에너지를 전기적 에너지로 직접 변환하기 때문에 중간 손실이 적어 에너지 전환 효율이 높고, 연료 공급만 유지된다면 지속적으로 전기 에너지를 발생시킬 수 있기 때문에 배터리보다 긴 작동시간을 보장받을 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 주 연료로 수소를 사용하는 친환경적인 특성까지 지니고 있기 때문에 차세대 동력원으로 주목받고 있다.

현재 무인항공기에는 고분자 전해질 막 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)를 주로 사용되고 있다. 그 이유를 살펴보면 상대적으로 낮은 작동 온도(약 80°C 이하)와 기존의 무인항공기에 적합한 출력 범위(1kW 이하), 기계적 가동부가 존재하지 않는 특성을 들 수 있다. 이는 곧 전장에서 은밀한 작전 수행과 더불어 열 혹은 소음에 의한 피탐지율을 낮출 수 있기 때문에 기체의 생존성(Survivability)을 향상시킬 수 있으며, 앞서 거론한 높은 에너지 효율 특성으로 체공시간 향상까지 기대할 수 있기 때문에 임무 수행 능력과 가용 자원으로써의 가치를 획기적으로 향상시킬 수 있게 된다.

하지만 이와 같은 연료전지의 기본적인 특성을 무인항공기에서 활용하기 위한 적용 연구는 앞서 거론한 것처럼 다양한 형태로 완성이 된 상태이다. 따라서 최근에는 이를 보다 더 효율적이고 효과적으로 가다듬기 위해서 연료전지 자체를 개선하거나 시스템의 B.O.P (Balance of Plant)를 보다 항공기의 특성에 맞추어 개선하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

이러한 B.O.P 개선 연구 중에서도 수소 저장 및 공급 시스템 개선을 통해 연료전지 무인기의 체공시간을 향상시키려는 연구를 주목할 필요가 있다. 그 이유는 항공기의 운용 특성상 매우 다양한 환경조건에 노출이 되고 연료가 되는 수소 저장밀도와 기체의 체공시간이 밀접한 연관을 가

진다는 점을 들 수 있다. 이러한 연구의 대표적인 사례로는 화학수소화물인 수소화붕소나트륨(Sodium Borohydride, NaBH<sub>4</sub>)을 알칼리 수용액 형태로 저장하고 필요한 경우, 촉매와 접촉시켜 가수분해 반응을 일으켜 발생된 수소를 연료전지에 공급하는 연구를 예로 들 수 있다.[5]

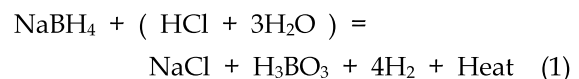
하지만 이 수용액-촉매 방법은 수소 저장밀도를 향상시킬 수 있지만, 촉매가 환경 조건과 내구성에 따른 수소 발생 성능 변화, 겨울 혹은 고고도와 같은 영하의 저온 환경에서 수소화붕소나트륨 수용액이 얼어붙는 문제점을 보유하고 있기 때문에 운용 환경에 제약을 초래하게 된다. 이러한 문제 이외에도 온도에 따른 NaBH<sub>4</sub>의 수용도 제약, 촉매 제작 및 준비에 따른 시스템 준비 시간과 시스템 비용 상승, 다량의 Na<sup>+</sup>이온 발생에 따른 PEMFC의 멤브레인 피독 현상 등을 유발하는 다양한 문제점 등이 보고되고 있다.[6]

따라서 이러한 문제들을 해결하고 수소 저장밀도를 높이기 위해서 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>를 묽은 염산(Hydrochloric Acid, HCl)을 이용하여 직접 분해하고 이를 이용하여 PEMFC를 구동하는 기초 연구가 조선대학교에서 수행된 바 있으며 [7-9], 이 기초연구를 바탕으로 시스템을 구성하기 위해 요구되는 수소 공급체계 구성 및 이를 이용한 수소 공급 시스템의 완성에 대한 연구를 다음과 같이 진행하였다.

## II. 유량 제어 및 환경 실험

### 2.1 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub> 분해

지난 기초 연구에서 식 (1)과 같이 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>에 묽은 염산을 주입하여 상태변화 및 촉매를 사용하지 않고 수소를 발생시키는 연구를 수행한 바 있다.



하지만 이 기초 연구에서 반응 후 생성된 결과물에 대해 XRD (X-Ray Diffraction) 및 EDS (Energy Dispersive Spectrometer) 분석을 수행한 결과, 예상되었던 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (Boric Acid, 붕산)가 생성되지 않고 Na, B, H, O 등이 포함된 매우 불규칙적인 화합물이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 붕산을 형성할 것으로 예상한 수소가

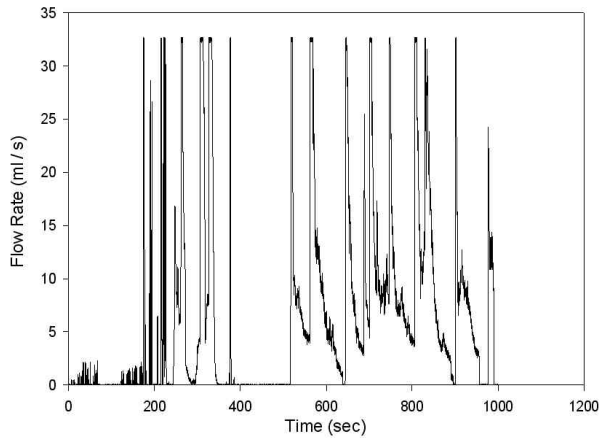


Fig. 1. pH 조절을 이용한 수소 발생 특성

추가적으로 방출되는 의미하며, 산(Acid)을 이용한 고체 상태 NaBH<sub>4</sub>의 직접 분해는 화학 반응보다는 식 (2)와 같은 NaBH<sub>4</sub>의 물질적 특성인 pH에 따른 반감기의 변화에서 기인한 것으로 생각된다. 여기서 T는 온도(Kelvin), pH는 수소 이온 농도, λ는 NaBH<sub>4</sub>의 반감기(분)를 의미한다.

$$\text{Log}_{10}\lambda = \text{pH} - (0.034T - 1.92) \quad (2)$$

식에서 볼 수 있듯이 고체 상태 NaBH<sub>4</sub>의 반감기는 pH에 따라 크게 바뀌며[10], 약 3N 농도의 묽은 염산을 사용할 경우 NaBH<sub>4</sub>의 반감기는 약 32ps(pico-seconds)까지 감소하므로 매우 빠르고 확실한 수소 발생이 가능함을 의미한다.

## 2.2 수소 공급의 안정화

앞서 거론한 것처럼 고체상태 NaBH<sub>4</sub>의 pH-반감기 특성을 이용하여 직접 분해하면 매우 빠르고 확실하게 수소를 발생시킬 수 있지만, Fig. 1과 같이 극도로 불안정한 수소 공급 특성을 띄게 된다. 이는 불규칙적으로 연료전지에 공급되는 수소의 과/부족 상태를 만들기 때문에 연료전지의 출력을 불안정하게 만들 뿐만 아니라, 특정 조건에서는 압력의 급증으로 인하여 시스템의 손상까지 유발할 수 있기 때문에 시스템 측면에서 바람직하지 못하다고 할 수 있다.

따라서 이러한 수소 공급 불안정 문제를 해결하기 위해서는 반응 자체를 제어하여 수소 발생량을 일정하게 만들거나, 수소 발생량이 불규칙적이더라도 시스템에 일정하게 공급하는 방법이 요구된다. 하지만 전자의 경우 pH 방법을 이용하면 극소량을 반응시켜도 매우 짧은 시간 이내에 격렬하게 반응이 일어나기 때문에 이를 연속적으로 일정하게 제어하는 방법은 현실적으로 매

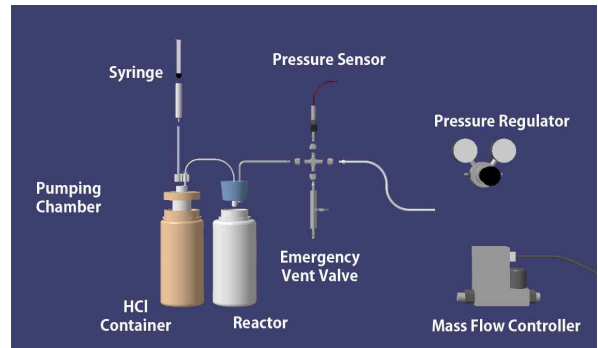


Fig. 2. 수소 공급 안정화 실험 장비

우 힘들다고 할 수 있다. 하지만 후자와 같이 수소 공급이 수소 발생과 관련된 변수에 영향을 받는 것을 최소화 하는 방법을 사용하면 다양한 상황에서 안정적인 시스템 작동을 보장할 것이라고 예상해 볼 수 있다.

따라서 이를 구현하기 위해 수소의 공급 불안정 현상을 보다 자세히 분석한 결과, 반응기 내부에서 묽은 염산과 접촉한 NaBH<sub>4</sub>가 순식간에 급격히 분해되면서 다량의 수소가 발생되지만, 사용 여부에 관계없이 즉시 반응기 외부로 배출되는 것을 원인으로 찾을 수 있었다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 염산 공급 등의 정밀 제어 방법을 사용하지 않더라도 발생된 수소를 반응기 내부에 일정량 가두어 두고 연료전지가 필요로 하는 정도만 안정적으로 공급할 수 있는 컨셉의 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다.

실험 장비는 크게 가압형 반응기, 염산 저장용기, 염산 공급용 수동 펌프, 수소 공급 안정 장치로 구성되어 있으며, 안정적인 수소 공급 여부를 확인하기 위해, 자체 수소 가압형 반응기에 가두어진 수소를 압력 혹은 유량 제어 장치만을 이용하여 수소 공급을 안정시키는 실험을 먼저 진행하였다. 공급되는 수소는 보다 정확한 측정을 위하여 수분 제거기(Water Trap 및 Silica Gel)를 통과시킨 후, 유량 측정장비(Mass Flow Meter)를 이용하여 측정하였으며, 반응기 내부의 압력 변동을 측정하기 위하여 압력 센서를 반응기에 직접 연결하였다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과에서 볼 수 있듯이 공급 유량만을 안정시킬 경우 공급 유량은 안정되지만 공급 압력의 불안정은 지속되며, 공급 압력만을 안정시킨 경우에는 공급 압력만이 안정되고 공급 유량은 불안정함이 지속되는 상반되는 특성을 확인할 수 있었다. 이 결과들을 단편적으로 살펴보면 두 방법을 모두 동시에 적용시켜야만 시스템 측면에서 안정적인 것이라고 말할 수 있지만,

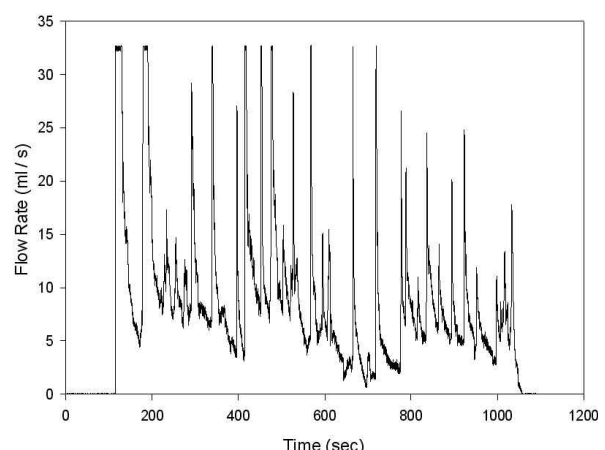
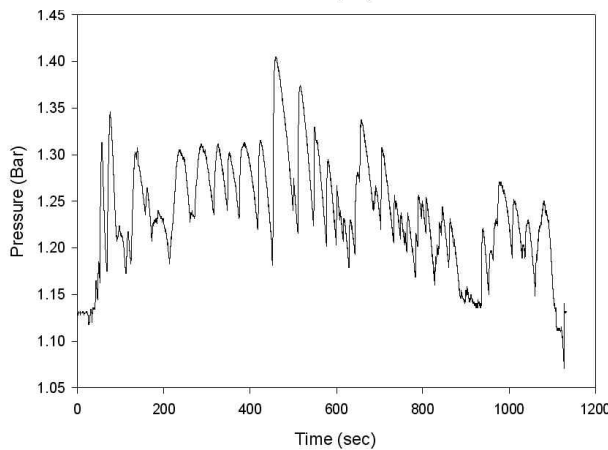
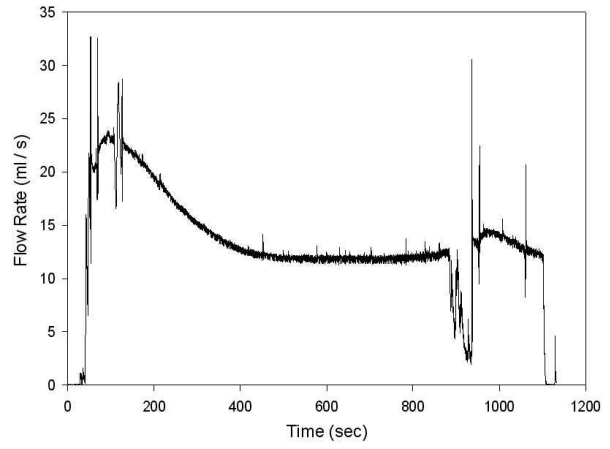
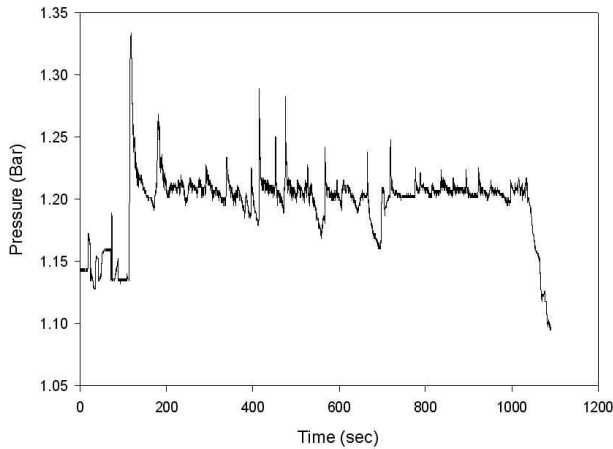


Fig. 3. 유량 안정 시 수소의 공급 특성

Fig. 4. 압력 안정 시 수소의 공급 특성

이를 실제 구현하기 위해서는 시스템 구성 요소가 증가하게 되어 무게증가와 같은 문제점을 불러오게 된다. 하지만, 이 실험 결과는 어디까지나 발생된 수소가 대기 중으로 방출되는 상태에 대한 묘사이므로, 실제 시스템에 대한 작동 특성과는 다소 차이가 있으며 수소가 공급되는 대상인 연료전지의 특성까지 같이 고려하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

먼저 개방형 수소 공급 체계를 가진 연료전지의 경우, 수소가 과다 공급되더라도 스택이 통과시키지 못한 수소가 외부로 그대로 배출되는 구조를 가지고 있다. 따라서 급격히 발생된 수소가 연료전지가 요구하는 유량보다 과다 공급될지라도 외부로 배출되기 때문에 내부 압력이 급격히 변화될 위험성은 낮다. 하지만 연료전지의 부하(Load)가 변화할 경우, 그에 따른 정확한 수소 유량만을 공급시켜야만 수소가 낭비되는 문제와 유량 부족으로 인한 출력저하와 같은 문제점을 방지할 수 있기 때문에 보다 시스템 설계 및 구성이 복잡해지는 단점을 내포하게 된다.

반대로 폐쇄형 수소 공급 체계를 가진 연료전

지를 살펴보면, 최근 대부분의 연료전지가 이와 같은 형태를 지니고 있으며, 수소가 과다 공급되더라도 스택을 통과하지 않는 이상 외부로 배출되지 못하기 때문에 낭비되는 수소를 획기적으로 줄일 수 있게 된다. 하지만, 수소의 공급이 스택이 처리할 수 있는 양을 초과하여 과다 공급되면 내부의 압력 상승을 초래하게 되므로 압력에 의한 손상의 위험성을 내포하게 된다. 따라서 폐쇄형 연료전지는 정상적인 작동을 위해 일정 범위 이내의 압력으로 수소를 공급할 필요가 있다. 따라서 이를 위해 압력 레귤레이터를 이용하여 공급 수소 압력을 적정 수준으로 조절하는 방법이 주로 사용된다.

이러한 실험 결과와 연료전지의 수소 공급 체계 특징을 바탕으로 좀 더 자세히 살펴보면, 폐쇄형 수소 공급 체계에 압력 레귤레이터를 사용하면 반응기 내부에서 필요 이상의 수소가 발생할지라도 압력 레귤레이터를 사용하면 압력에 의한 연료전지 손상을 방지할 수 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 스택에서 사용되지 않은 과다 발생된 수소는 외부로 배출되지 못하기 때문에

연료전지가 유량제어의 역할까지 동시에 수행하는 상황을 유도할 수 있다. 이는 곧 수소 공급 유량 및 압력을 모두 안정화시킬 수 있을 것으로 예상해 볼 수 있다.

뿐만 아니라, 반응기 내부에 일정 압력 이상의 수소가 저장되는 가압형 반응기를 구성할 경우 다소 불규칙적이고 간헐적으로 NaBH<sub>4</sub>를 분해시켜도 반응기에 저장된 여분의 수소를 이용한 연료전지 구동이 가능하게 된다. 이는 곧 펌프를 연속적으로 작동시킬 필요가 없어지며, 주입되는 산의 유량을 정밀하게 제어할 필요가 없어짐을 의미하기 때문에 보다 정밀도에 대한 의존성을 줄이면서 단순하면서도 간편한 시스템 구성이 가능할 것을 예상해볼 수 있다.

### 2.3 저온 환경 실험

앞서 살펴본 것처럼 공급 수소의 안정화 이외에도 운용 환경에 대한 안정화도 고려할 필요가 있다. 가령 항공기의 경우 기본적으로 운용 지역의 계절 변화와 같은 수동적인 환경 온도 변화와 임무 수행을 위한 고도 상승과 같은 능동적인 환경 온도 변화에 노출되게 된다.

이러한 환경 변화를 국내 기준으로 살펴보면 겨울에는 최저 -30℃의 환경에 노출되며, 운용고도를 기준으로 살펴보면 통상적으로 전술 항공기들이 주로 활동하는 25,000ft에서는 약 -35℃, 통상 전술 항공기들의 상승 한계고도인 65,000ft에서는 약 -56.5℃의 극한의 온도 조건에 노출되게 된다. 이는 곧 연료전지 무인항공기를 위한 수소 발생 시스템은 필연적으로 환경 조건에 대한 고려가 요구되는 것을 의미한다.

하지만, 본 연구에서 주로 사용하고 있는 농도 3N의 묽은 염산은 약 -17℃에서 얼기 시작하므로, 특정 겨울 환경이나 16,000ft 이상의 고도 조건에서는 NaBH<sub>4</sub>를 분해시킬 방법이 원천적으로 차단될 위험을 내포하게 된다.

이러한 빙결 문제는 비단 pH-반감기 방법에만 해당되는 것이 아닌, 기존의 수용액-축매 방식에서도 동일하게 발생하는 문제점으로써, 가령 수소 저장 밀도를 높이기 위해 수용액에 포함된 NaBH<sub>4</sub>의 농도를 높이거나 저장 안정성을 높이기 위해 NaOH의 농도를 높이면 어는점이 상승하여 연료원인 NaBH<sub>4</sub> 수용액 자체가 얼어붙기 쉬워지는 문제점을 내포하게 된다. 이는 아직까지는 이에 대한 원천적인 해결 방법은 보고된 바 없으며, NaBH<sub>4</sub>와 NaOH 모두가 어는점에 영향을 주기 때문에 해결해야할 변수가 많아지는 문제점도 동시에 포함하게 된다.

Table 1. 대표적인 빙결 방지 첨가제

	Propylene Glycol	Diethylene Glycol Monomethyl Ether	Ethylene Glycol
CAS No.	57-55-6	111-77-3	107-21-1
화학식	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
어는점	-59℃	-70℃	-45℃
독성	없음	있음	있음

따라서 본 연구에서는 이러한 빙결 문제 해결을 통하여 보다 폭넓은 시스템의 작동 범위를 보장하기 위해 다음과 같은 연구도 함께 진행하게 되었다.

통상적인 빙결 방지 대책으로는 빙결 방지 물질을 첨가하는 것이 주로 사용되는데, 본 연구에서 문제가 되는 염산 용액에 포함된 물이 얼어붙는 문제를 방지하기 위해서 물에 대해서 흔히 사용되는 빙결 방지 첨가제를 조사한 결과 Table 1과 같은 첨가제를 찾을 수 있었다.

하지만 표에서 볼 수 있듯이 Ethylene Glycol은 독성을 지니고 있음이 널리 보고되어 있기 때문에 취급 문제 등을 고려하여 보다 독성이 적은 Propylene Glycol을 이용한 빙결 방지에 대해 실험을 수행하되, 보유하고 있는 저온 환경 묘사 장비의 한계로 -35~-40℃의 범위까지만 실험을 수행하기로 하였다.

묽은 염산의 빙결 방지 처리는 염산의 희석에 사용되는 물을 Propylene Glycol과 혼합 처리하는 형태로 진행하였으며, 저온 실험 결과 약 -35~-40℃ 환경에서 1개월 이상 노출되어도 빙결이 전혀 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 빙결은 발생하지 않은 것과 별개로 수소 발생 성능에 영향을 주는 요소가 존재하는지 여부는 알 수 없었기에 다음과 같은 수소 발생 성능 변화에 대한 실험을 진행하였다.

빙결 방지에 대한 수소 발생 실험은 2.2절에서 사용한 것과 동일한 장비로 -5℃와 -35℃ 환경조건에서 진행되었으며, 보다 정확한 실험을 위해 약 2시간 이상 해당 온도에 노출시켜 환경과의 온도 차이를 최대한 제거한 상태에서 진행하였다. 또한, 발생된 수소는 앞서 수행되었던 실험들과 동일하게 수분 제거 후 유량을 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 정리하였다. 각각 상온에서 특수 처리를 하지 않은 동일한 농도의 묽은 염산의 수소 발생 성능과 비교하면 이론상 가수분해 대

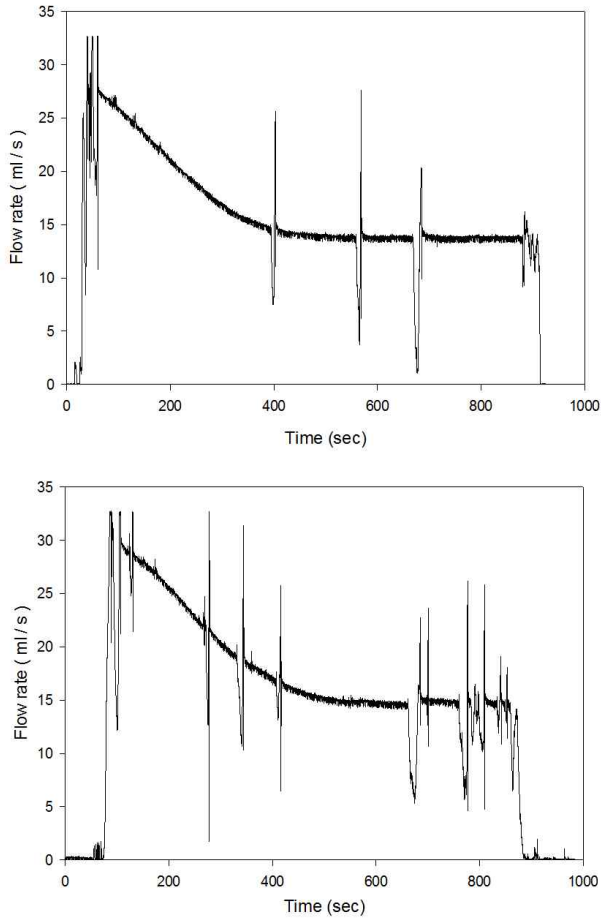


Fig. 5. 부동 처리를 통한 영하 환경에서의 수소 발생 (위 : -5°C, 아래 : -35°C)

비 112.8% 및 111.17%의 수소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구가 진행되기 전에 수행되었던 기초 연구와 본 실험의 결과를 종합해보면 다음과 같다. pH-반감기 방법을 이용하여 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>를 분해하여 수소를 발생시킬 경우, 최소 -40°C에서 80°C까지 수소 발생 성능에 영향을 받지 않으며, 영하 조건에서 빙결과 같은 문제가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 다시 말하자면 환경 조건에 따른 연료전지 무인기의 운용 제약을 줄여줄 수 있기 때문에 보다 다양하고 폭넓은 환경에서 운용을 가능하게 할 수 있는 가능성을 제시할 수 있다고 생각하는 바이다.

### III. 시스템 설계 및 성능평가

#### 3.1 시스템 설계

앞서 수행되었던 기초 연구와 유량 제어 및 환경 실험을 거치며 파악된 시스템 구성과 관련

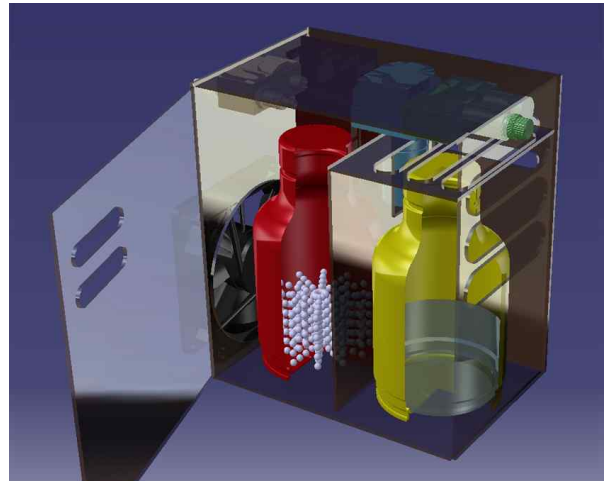


Fig. 6. 통합형 수소 발생 및 공급 시스템

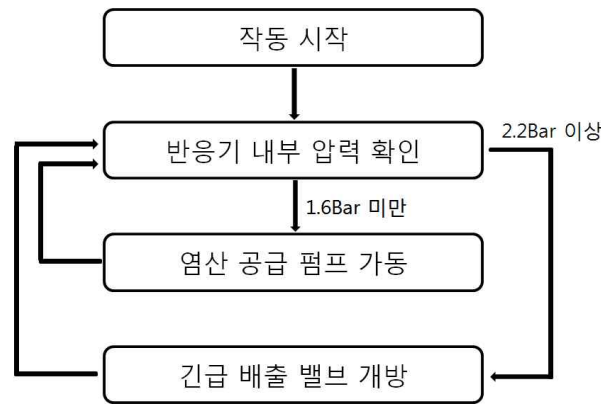


Fig. 7. 시스템 작동 패턴

된 다양한 특성들을 바탕으로 Fig. 6과 같은 통합형 시스템을 설계하였다.

시스템은 크게 수소 생성 계통과 수소 공급 계통으로 나눌 수 있으며, 보다 자세히 살펴보면 수소 생성 계통은 반응기, 염산 저장 용기, 염산 이송 펌프 등으로 구성되어 있고, 수소 공급 계통은 제어 기관, 비상 배출 밸브, 압력 레귤레이터 등으로 구성되어 있다.

이 시스템은 Fig. 7와 같은 작동 패턴을 가지며, 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>는 반응기 내부에 저장된다. 수소 발생은 염산 저장 용기에 저장된 묽은 염산이 이송 펌프에 의해 반응기로 공급되면, 염산과 접촉한 NaBH<sub>4</sub>가 낮아진 pH 환경에 의해 자연 분해되면서 수소를 방출하게 된다. 이 과정에서 반응기와 NaBH<sub>4</sub> 저장 공간을 별도로 나누지 않았기 때문에 발생한 수소가 반응기를 직접 가압하게 되며, 이를 항상 일정 압력 이상으로 유지함으로써 반응기는 수소 저장 탱크와 유사한 역할을 수행하게 된다.

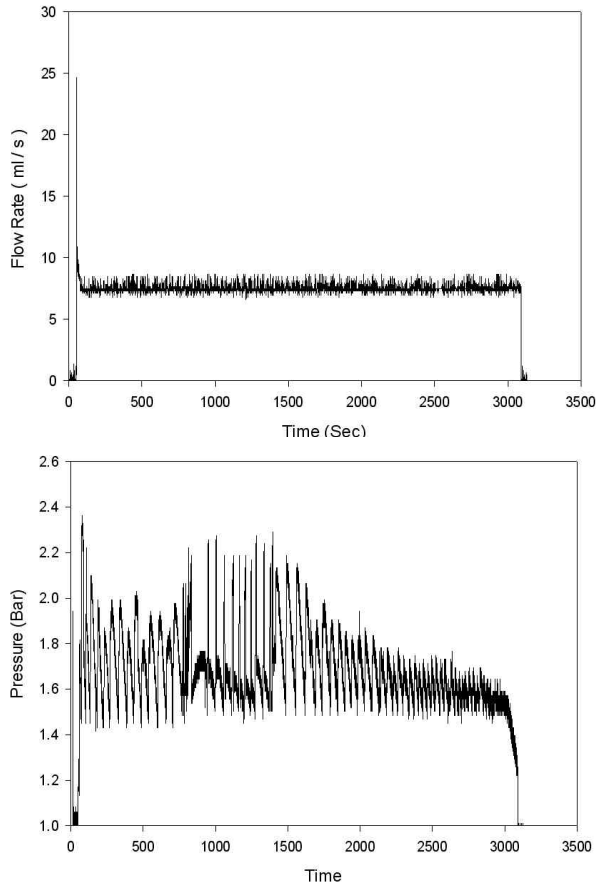


Fig. 8. 통합형 시스템의 수소 공급 특성 (위 : 유량, 아래 : 반응기 압력)

이러한 가압형 반응기는 폐쇄형 연료전지와 조합되어 작동되기 때문에 연료전지가 단순한 전기 발생만이 아닌 유량 제어 및 반응기 내부 가압을 위한 밸브의 역할도 함께 수행하기 때문에 시스템 경량화에도 큰 도움을 주게 된다.

기본 구동 실험은 폐쇄형 연료전지 대신 이와 유사한 작동 특성을 재현할 수 있는 유량 제어 장비(MFC, Mass Flow Controller)를 가상 연료전지로 이용하여 진행하였으며, 발생한 수소는 수분 제거 장비를 거친 다음 유량 측정 장비를 통해 측정하였으며, 반응기 내부의 압력은 압력 센서를 이용하여 측정하였다. 특히 반응기 내부의 압력은 절대압력으로 약 1.6Bar 이상으로 작동하되 약 2.3Bar를 초과하면 비상 배출 밸브가 작동하도록 제어 계통을 구성하고 실험을 수행하였으며, 그에 대한 수소 공급 유량 및 압력 특성에 대한 결과를 Fig. 8에 정리하였다.

결과에서 볼 수 있듯이 가상의 폐쇄형 연료전지 구동에 있어서 지속적으로 안정적인 유량 공급이 가능한 것을 확인할 수 있으며, 반응기 내부 가압 압력 역시 설정한 범위 내에서 꾸준히

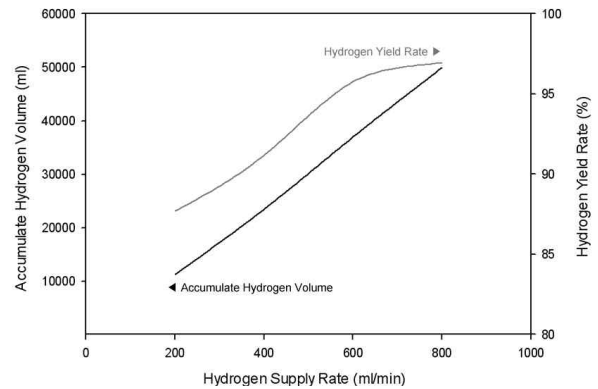


Fig. 9. 공급 유량에 따른 전환율

유지되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 일부 구간에서 압력의 불규칙적인 변화가 발견된 것으로 미루어보아 제어 및 구동 패턴의 최적화 실험이 추가로 요구된다고 판단하는 바이다.

### 3.2 수소발생 성능 평가

3.1절에서 수행한 기초 구동 실험 결과를 바탕으로 보다 다양한 작동 특성 및 성능 평가를 위해 공급 유량에 대한 가수분해 대비 수소 발생률, 묽은 염산의 에이징(Aging)에 따른 성능 변화 여부, 시스템 내부 온도 등에 대한 추가적인 성능 평가를 수행하였다.

첫 번째로 가수분해 대비 수소 발생률을 확인하기 위해 200, 400, 600, 800ml/min의 수소 공급 조건에 대해서 실험을 수행하였다. 시스템의 작동 패턴은 앞서 Fig. 7에서 나타난 것과 동일하며, 묽은 염산은 모두 동일한 3 N 농도의 묽은 염산을 사용하였다. 하지만 묽은 염산의 주입 패턴은 시스템의 가압시 안정성을 증가시킬 목적으로 반응기 내부 압력이 1.6Bar 이하에서만 1초간 공급하고 내부 압력 변화를 확인하기 위해 1초간 대기하는 시간을 설정하였다.

실험 결과는 Fig. 9와 같으며 실험 범위 내에서 수소의 공급 속도가 일정 이상의 조건에 도달하기 전까지는 점차적으로 증가하지만, 일정 속도 이상에서는 이론상 가수분해대비 95±3%의 성능 이내를 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

이는 다시 말하자면 같은 시간에 보다 많은 수소를 발생시키기 위해서는 이를 분해하기 위해 보다 많은 양의 염산 공급이 요구되기 때문에 기초 연구에서 수행한 바 있는 염산의 주입속도에 따른 수소 발생 성능 관계와도 유사성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

다만, 이전의 기초 연구 결과와 비교해보면 수소 발생률 측면에서 이론대비 가수분해 성능이



Table 2. 염산의 에이징 효과 발생 여부

제조 시기	발생량 (ml)	발생률 (%)	H <sub>2</sub> 공급유량 (ml/min)
1시간 경과	24507.83	95.21	850
2개월 경과	24394.28	94.77	850

다소 낮게 나오는 것을 확인할 수 있는데, 이는 공급 수소 안정화를 위해 추가된 압력 레귤레이터와 같은 구성품 및 각종 연결부, 그리고 작동 조건 변화에 따라서 발생한 미세 누설, 시스템을 보다 안정적으로 작동시키기 위한 염산 주입 패턴의 변화로 인한 반응 속도의 변화 등에서 기인한 것으로 판단되며, 추가적인 수소 분해 성능 확보를 위해서는 시스템의 최적화와 관련된 추가적인 실험이 요구된다고 판단하는 바이다.

두 번째로 본 시스템을 운용하기 위해서는 묽은 염산을 사용하게 되는데 묽은 염산을 매번 필요한 양만큼 제조하여 사용하는 것이 정확성 측면에서는 바람직하지만, 실제 시스템을 운용하는 측면에서 접근해보면 보다 잦은 준비 및 관리가 요구되기 때문에 바람직하다고 할 수 없다.

따라서 한 번에 다량의 묽은 염산을 제조하고 저장한 뒤, 사용하는 방법이 보다 바람직하다고 할 수 있으나, 묽은 염산이 제조된 이후 장시간 방치됨에 따른 수소 발생 성능 변화가 발생하는 것은 바람직하지 못하기 때문에 이에 대한 에이징 효과를 확인하는 실험을 다음과 같이 진행하였다.

실험은 제조 후 약 1시간과 약 2개월이 경과한 3N 농도의 묽은 염산을 이용하여 진행하였으며, 발생된 수소량과 발생 특성의 차이가 있는지를 비교하는 형태로 진행하고 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 염산의 제조시기에 따른 에이징 효과는 발생하지 않았으며, 이는 실제 시스템에 있어서 미리 준비한 염산을 장기간에 걸쳐 사용해도 되기 때문에 시스템 구동 준비 시간 단축 및 유지비 단축 측면에서 매우 유리한 장점으로 작용할 것으로 판단하는 바이다.

마지막으로 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>가 붕괴되어 수소를 방출할 경우 열이 함께 방출되는데, 이때 지나치게 많은 열이 발생할 경우 주변 시스템의 온도를 상승시켜 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 발생되는 수소가 고온을 유지할 경우 연료전지의 내구성 측면에서도 부정적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 사전 실험을 수행하기로 하였다. 실험은 시스템 내부에 센서를 부착하고 발생된 열에 대한 특성을 파악하는 형태로 진행하였

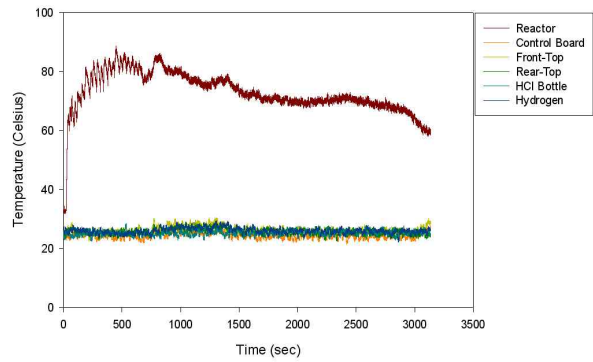


Fig. 10. 시스템 작동에 따른 내부 온도 변화

다. 자체 가압형 반응기는 얇은 금속 재질로 구성된 반응기를 사용하였으며, 90mm 직경의 냉각용 공랭식 팬(12V, 2.4W)만을 이용하여 시스템 내부를 냉각하는 형태로 실험을 진행하였다.

실험 결과는 Fig. 10과 같으며, 반응기 내부에 고체상태의 NaBH<sub>4</sub>를 저장하기 때문에 반응기 하부의 온도가 약 80°C까지 상승하는 등 가장 많은 열이 발생하였다. 하지만, 시스템 내부는 간단한 공랭식 팬을 이용한 냉각만으로 상온에 가깝게 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 기존의 수용액-촉매 방식으로 발생된 수소의 온도가 60~90°C에 도달하는데 비해서 별도의 추가 냉각장비 없이 pH-반감기 방법으로 발생된 수소를 상온에 가까운 온도로 수소를 연료전지에 공급할 수 있었다.

이러한 원인으로는 수용액-촉매 방식의 경우 상대적으로 비열 용량이 높은 물이 지속적으로 반응열에 노출되어 냉각이 보다 어려운데 비해, pH-반감기 방법의 경우 상대적으로 비열 용량이 낮은 고체상태의 NaBH<sub>4</sub>가 반응열에 주로 노출되기 때문에 보다 냉각에 유리한 형태를 지니기 때문인 것으로 판단하는 바이다.

뿐만 아니라, 연료전지 피독 측면에서도 나트륨 이온의 원천인 NaBH<sub>4</sub>가 염산에 포함된 물에 녹아들어가기 직전까지 고체 상태를 주로 유지하기 때문에 나트륨 이온이 증기와 함께 배출되는 위험성이 적으며, 이 나트륨 이온 역시 염산 수용액에 포함되어 있던 염소 이온과 결합하여 염화나트륨(NaCl, Sodium Chloride)을 형성하기 때문에 나트륨 이온이 다량 포함된 물이 지속적으로 끓어올라 다량의 나트륨 이온이 방출되는 수용액-촉매 방식에 비해서 전지의 피독 측면에서도 보다 유리한 측면을 가질 수 있으며, 이는 시스템의 안정성과 연료전지의 수명을 증가시키고 더 나아가서 시스템의 단순화에도 큰 도움을 줄 수 있을 것이라고 판단하는 바이다.



#### IV. 결 론

수소 연료전지 항공기를 위한 연료전지 시스템에 최적화된 B.O.P 연구의 일환으로 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>를 이용한 수소 발생기에 대한 연구 및 검증실험을 수행하였다.

수소의 안정적인 공급 방법에 있어서는 반응기 자체를 발생된 수소로 가압하되, 폐쇄형 연료전지에 압력 레귤레이터로 공급되는 수소의 압력을 안정시켜 공급하는 방식을 이용함으로써, 연료전지의 손상을 막고 동시에 연료전지가 유량 제어 밸브의 역할을 동시에 수행하는 방법에 대해 제시하였으며, 반대로 개방형 연료전지일 경우 공급되는 유량을 제어하여 안정적인 공급을 유지하는 방법에 대해 제시하였다.

영하와 같은 저온 환경에서 안정적이고 성능 변화 없는 수소 발생을 위해서 Propylene Glycol 과 물을 이용하여 염산을 희석하여 묽은 염산을 제조한 결과 -35°C 환경에서 빙결 현상을 방지하고 안정적인 수소 발생이 가능함을 확인하였다.

이를 바탕으로 통합형 수소 발생기를 설계하여 기본 구동 및 수소 발생 성능 평가를 수행한 결과, 수소 발생 성능이 이론상 가수분해 대비 약 95±3%의 성능을 가지며, 제조된 묽은 염산의 에이징 효과에 따른 수소 발생 성능의 변화가 없음을 확인하였다. 또한, 고체 상태의 NaBH<sub>4</sub>를 직접 분해할 경우 보다 냉각에도 유리하기 때문에 발생된 수소의 온도를 간단한 공랭식 냉각만으로도 상온에 가깝게 냉각시켜 연료전지에 공급할 수 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 시스템의 안정성과 연료전지의 수명을 증가시키고 더 나아가서 시스템의 단순화 및 경량화에도 도움이 될 수 있음을 확인하였다.

그리고 차후에 본 연구를 바탕으로 시스템 구성 최적화 및 연료전지 구동에 대한 실험을 수행할 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

#### 참고문헌

- 1) 김근배, "연료전지항공기 기술 동향." 한국항공우주연구원, *항공우주산업기술동향*, 제7권, 제2호 2009.12, pp. 95-105
- 2) McConnell, V.P., "Military UAVs claiming the skies with fuel cell power." *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2007, Issue 12, December 2007, pp. 12-15
- 3) Elsevier, "Horizon's hydrogen-powered UAV breaks distance record." *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2008, Issue 1, January 2008, pp. 4-5
- 4) Elsevier, "Horizon goes commercial with fuel cell for UAVs." *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2010, Issue 8, August 2010, pp. 1
- 5) Taegyung Kim, Sejin Kwon, "Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 615~622.
- 6) Hyun Jae Kim, Kyoung-Jin Shin, Hyun-Jong Kim, et al, "Hydrogen generation from aqueous acid-catalyzed hydrolysis of sodium borohydride." *Int. J. Hydrogen Energy*, , Volume 35, Issue 22, 2010, pp. 12239~12245
- 7) 이충준, 김태규, "연료전지 항공기를 위한 고체상태 NaBH<sub>4</sub>의 수소발생 및 연료전지 구동 특성," *한국항공우주공학회지*, Vol. 39, No. 9, 2011, pp. 858~865.
- 8) 이충준, 김태규, "연료전지 UAV를 위한 고체 상태 NaBH<sub>4</sub> 직접 분해 및 수소 공급 시스템 설계," 한국수소 및 신에너지 학회, *2012년도 춘계학술대회*, 2012, pp. 260~263.
- 9) 이충준, 김태규, "연료전지 UAV의 친환경 추진 시스템을 위한 통합형 수소 공급 시스템 연구," 한국추진공학회, *2012년도 제38회 춘계학술대회 논문집*, 2012.5, 149-152
- 10) Rohm & Hass, "The Sodium Borohydride Digest." 2003, pp. 10