

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(3), 226-232(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.3.226>

## 화학수소화합물을 이용한 소형 무인항공기용 연료전지 시스템 연구

## I. 경량 수소 발생 및 제어 장치

홍지석\*, 정원철\*, 김현진\*, 이민재\*, 정대성\*, 전창수\*, 성홍계\*, 신석재\*\*, 남석우\*\*

## Fuel cell system for SUAV using chemical hydride

## I. Lightweight hydrogen generation and control system

Ji-Seok Hong\*, Won-chul Jung\*, Hyeon-Jin Kim\*, Min-Jae Lee\*, Dae-Seong Jeong\*

Chang-Soo Jeon\*, Hong-Gye Sung\*, Seock-Jae Shin\*\* and Suk-Woo Nam\*\*

Korea Aerospace University, School of Aerospace and Mechanical Engineering\*,

Korea Institute of Science and Technology, Fuel Cell Center\*\*

## ABSTRACT

A compact hydrogen generation device of fuel cell system using chemical hydride storage technique was designed to fit the propulsion device requirement of a small unmanned aerial vehicle(SUAV). For high efficient, compact, and lightweight hydrogen generation control device, the Co-B catalyst hydrogen conversion rate by  $\text{NaBH}_4$  aqueous solution flux is measured so that the proper amount of Co-B catalyst for maximum hydrogen generation of 100W stack was proposed. A compact hydrogen generation device is controlled by pump's on/off using its own internal pressure and consumes fuel in high efficiency through a dead-end type fuel cell. The fuel cell system has stable operation for a planed flight profile. The system operates up to maximum 7 hours and at least 4 hours for tough flight profiles.

## 초 록

소형 무인항공기의 동력장치로 연료전지 시스템을 적용하기 위해 화학수소화합물 수소 저장방법을 이용한 소형 수소 발생 제어장치를 설계하였다. 효율이 높은 소형/경량 수소 발생 제어장치를 설계하기 위하여  $\text{NaBH}_4$  수용액 공급 유량에 따른 Co-B 촉매의 수소 전환율을 확인하였고, 100W 스택의 최대 수소 발생량에 적합한 Co-B 촉매양을 제안하였다. 효율적인 연료 소모를 위해 Dead-end 방식의 스택을 선택하였고, 수소 발생 제어장치 내부 압력을 이용한 펌프 on/off 제어로 수소 생성량을 제어하였다. 소형 수소 발생 제어장치를 이용한 연료전지 시스템의 각 작동구간에서 안정된 운전을 확인하였다. 장시간 운전 실험을 통하여 최대 7시간 운전이 가능하며, 임의의 비행 프로파일에 요구되는 추력 프로파일은 최소 4시간 이상 조정 가능함을 확인하였다.

**Key Words** : Sodium Borohydride(수소화붕소나트륨,  $\text{NaBH}_4$ ), Fuel Cell(연료전지), Co-B catalyst(Co-B 촉매), Hydrogen generation control system(수소 발생 제어 시스템)

† Received: September 29, 2012 Accepted: February 26, 2013 <http://journal.ksas.or.kr/>\* Corresponding author, E-mail : [hgsung@kau.ac.kr](mailto:hgsung@kau.ac.kr)

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## I. 서 론

최근 국내·외 연료전지 시스템 개발 연구는 활성화되어 가정용, 발전용 연료전지 시스템 연구가 진행되고 있고 그 추세는 소형/이동용 연료전지 시스템에 대한 연구까지 확장되고 있다. 특히 외국에서는 소형/이동용 연료전지 시스템 개발에 이미 착수하여 제품화를 이루고 있으며 성능향상 및 신뢰도를 입증하기 위하여 무인항공기에 적용하고 장시간 체공 기록을 경쟁하고 있다. 대표적인 사례로 2003년에 미국 에어로바이런먼트(Aerovironment)사가 액체수소저장방법을 사용하는 PEM연료전지 시스템으로 시험비행에 성공한 이후 2007년에는 화학수소화합물인 수소화붕소나트륨( $\text{NaBH}_4$ )을 수소 저장방법으로 사용하는 PEM연료전지 시스템을 무인기에 탑재하여 시험비행에 성공하였다.<sup>(1,2)</sup> 또한 싱가포르의 Horizon Fuel cell사에서도 소형 연료전지 시스템 개발을 진행하였고 독일의 항공우주연구소(DLR)에서 개발한 무인항공기 'Hyfish'에 적용되어 시험비행에 성공한바 있다. 이후 지속적인 연구결과 상용제품인 'AEROPAK'을 개발하여 세계 각 나라의 항공우주연구소에서 보유하고 있는 소형 무인항공기에 적용하며 시험비행을 수행하고 있다<sup>(3,4)</sup>. 국내에서는 2007년 카이스트에서 50 W급 연료전지 무인항공기 연구를 시작<sup>(5)</sup>으로 KIST와 한국항공대학교, 조선대에서 소형 수소 발생장치를 이용한 연료전지 시스템을 연구하고 있다<sup>(6,7,8)</sup>. 이미  $\text{NaBH}_4$  수용액을 이용한 수소 저장 및 발생에 대한 연구는 국내에서도 기초 실험을 시작으로 현재 무인항공기에 적용하기까지 많은 연구가 수행되어왔다. 그 결과  $\text{NaBH}_4$  수용액을 이용한 수소 발생장치에 대한 연구는 촉매의 조성, 환경테스트, 수소발생기를 이용한 연료전지 시스템에 대한 내용이 발표되어 왔다<sup>(9,10)</sup>. 하지만 출력에 따라 필요한 촉매량이나 화학수소화합물의 공급량 결정 및 수소 발생 제어방법 등에 대해서는 명확하지 않거나 미비하게 발표되어있다.

따라서 본 연구에서는 연료전지에서 요구되는 수소를 발생하기 위해 필요한 촉매 양을 결정하고 수소 전환율에 영향을 미치는 인자에 대해 실험적으로 접근한다. 또 연료전지의 출력에 따른 수소 발생량 제어 방법에 대해 다루고 소형 수소 발생 제어장치를 이용한 연료전지 시스템을 설계하고 장시간 안정성을 평가하여 무인항공기의 추진시스템으로 적용에 타당하지 확인하였다.

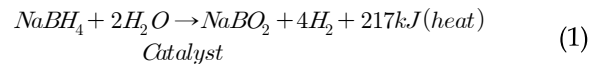
## II. 소형 수소 발생 장치를 이용한 연료전지 시스템 설계

### 2.1 $\text{NaBH}_4$ 를 이용한 수소 발생 장치

#### 2.1.1. $\text{NaBH}_4$ 수소 저장 방법

연료전지에 공급되는 수소를 저장하기 위한 방법에는 압축수소 저장법, 액체수소 저장법, 금속 수소화물 저장법, 화학수소화합물 저장법이 있다. 이 중에서 화학수소화합물 저장법은 높은 에너지 밀도 및 저장이 용이하고 생성 수소의 순도가 높으며 제어가 용이한 장점을 가진다고 알려져 있다. 여러 화학 수소화합물중  $\text{NaBH}_4$ 는 상대적으로 높은 수소 함량(10.8 wt%, 가수분해에 의한 물로부터 공급되는 수소를 고려시 21.3 wt%)을 가지고 상온에서 안정되며, боро하이드라이드계 수소화물 중에서 가장 낮은 합금 가격을 형성하는 것으로 알려져 있다<sup>(11)</sup>. 이  $\text{NaBH}_4$ 는 상온에서 안정하고 불연성의 알카리 용액으로 저장 및 취급이 용이하여 소형 수소 발생장치에 적합한 장점을 가지고 있다.

$\text{NaBH}_4$ 의 가수분해반응을 통한 수소발생 화학반응식은 다음과 같다.



또한  $\text{NaBH}_4$  수소 발생 시스템은 반응 부산물인  $\text{NaBO}_2$ 가 환경 친화적인 물질이라는 것도 장점이다. 그러나  $\text{NaBH}_4$ 는 물과 반응하여 자발적으로 수소와  $\text{NaBO}_2$ 로 분해되는 자가 가수분해반응(self-hydrolysis)을 하며 이는 상온에서 저장하였을 때 수소 저장 손실을 의미한다. Kreevoy와 Jacobson 등은 이러한  $\text{NaBH}_4$ 의 자가 가수분해 반응에 대한 자세한 연구를 통하여  $\text{NaBH}_4$ 의 가수분해가 pH와 온도에 관련이 있다는 것을 보고하였다<sup>(12)</sup>.

$$\text{Log}t_{1/2} = \text{pH} - (0.34T - 1.92) \quad (2)$$

여기서  $t_{1/2}$ 는  $\text{NaBH}_4$  양의 절반이 분해되는데 소모되는 시간(half life time)을 의미하며, T는 켈빈 온도(K)이다. 즉  $\text{NaBH}_4$ 의 자가 가수분해반응은 용매의 pH가 높을수록 혹은 온도가 낮을수록 저하된다는 것을 알 수 있으며, 이는  $\text{NaBH}_4$ 를 pH가 높은(pH>13) 알카라인 용액에 용해하고 저온에 저장할 경우 자가 가수분해에 의한 손실 없이 안정적으로 오랫동안 수소를 저장 할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 특징

은 알카라인 용액에 용해된  $\text{NaBH}_4$ 는 사용자가 원할 때 촉매(Catalyst)와의 접촉을 통해서만 수소 발생시킬 수 있는 장점을 가지게 된다.

따라서 본 연구에서는 알카라인 용액에  $\text{NaBH}_4$ 를 용해시켜 액체 상태로 수소를 저장하고 원하는 시점에  $\text{NaBH}_4$  수용액을 촉매에 공급하는 방식으로 수소 발생을 제어한다.

### 2.1.2 Co-B 촉매

Ni 다공성 지지체(porous foam)를 지지체로 사용하는 Co-B 촉매를 제작하기 위하여 전구체인  $\text{CoCl}_2$  (Aldrich) 수용액을 제조하였고, 환원제로  $\text{NaBH}_4 + \text{NaOH}$  수용액을 사용하였다. Ni 다공성 지지체에 전구체  $\text{CoCl}_2$  수용액을 충분히 적시고 환원제인  $\text{NaBH}_4 + \text{NaOH}$  수용액을 첨가하여  $\text{Co}^{2+}$ 가 환원되도록 하였다. Co-B 촉매는 위의 과정을 20회 정도 반복하며 Ni 다공성 지지체에 충분히 증착되도록 제작 되었다. 제작된 Co-B 촉매는  $200^\circ\text{C}$  아르곤 분위기에서 2 시간 동안 소성하였다. Fig. 1 (a), (b)는 제작된 Co-B 촉매의 SEM(Scanning electron microscope) 사진으로 40배율로 측정하였다. Ni 다공성 지지체(a) 위에 대략  $75\mu\text{m}$  크기의 Co-B 촉매가 조밀하게 코팅(b)된 것을 확인할 수 있다.

### 2.1.3 수소 발생 실험 장치

본 연구의 수소 발생 시스템에서 연속적으로 공급되는  $\text{NaBH}_4$  수용액은 높은 전환율로 수소를 발생시키기 위하여 충분한 양의 촉매를 필요로 한다. Co-B 촉매는 위에 언급한 본 연구의 제조 공정으로 Fig. 1 (c) 형상에 3.4 g의 촉매를

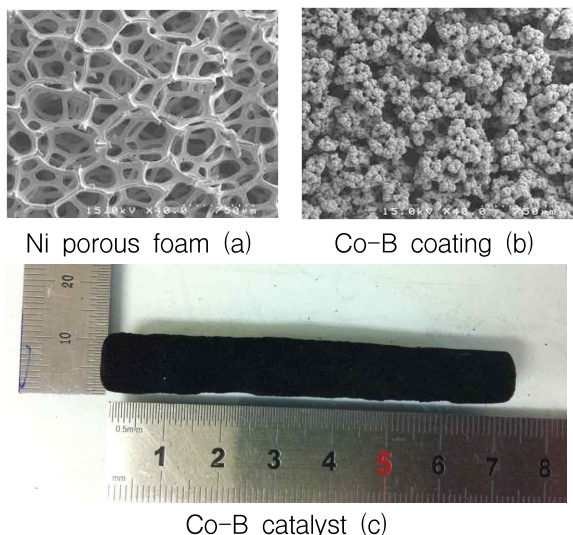


Fig. 1. SEM result of Co-B catalyst coated on Ni porous foam

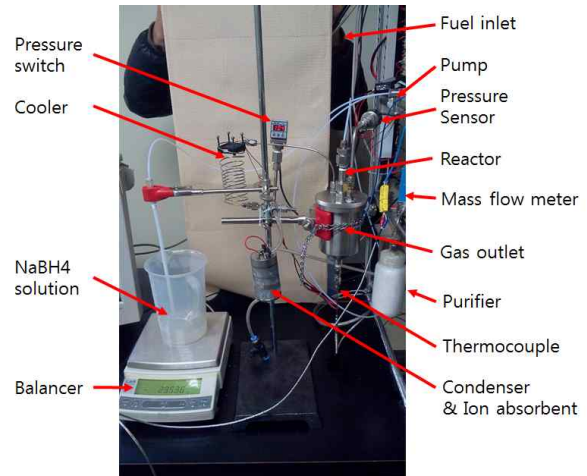


Fig. 2. Hydrogen generation test bench

제작하기 위하여 평균 20000 원/개의 비용이 요구되므로 Co-B 촉매 제조비용 측면에서 연료전지의 최대 요구 수소량에 적절한 촉매량을 사용하는 것이 필요하다. 따라서 수소 발생량에 알맞은 촉매량이 결정되어야 한다. 본 실험에서는 촉매량과 공급되는  $\text{NaBH}_4$  수용액의 유량에 따른 수소 전환율을 분석하였다. 본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2 와 같다.  $\text{NaBH}_4$  수용액의 공급 유량은 저울을 이용해 측정하고, 연속적으로 공급되는 유량을 미세제어 공급하기 위하여 마이크로 기어 펌프(mzr-2911)를 사용하였다. 또한  $\text{NaBH}_4$  수용액이 촉매에 잘 퍼지게 하기 위하여 원통형으로 제작된 촉매를 수직으로 세워 위에서 아래로 흘러보내도록 설계하였다. 생성물인  $\text{NaBO}_2$ 와 수소를 분리하는 분리통이 촉매 아래에 위치하고, 생성물을 충분히 저장할 수 있도록 용량 500 ml 으로 제작하였다. 발생된 수소는 발열반응에 의해 온도가 높고 수증기를 포함하기 때문에 순수한 수소를 얻기 위해 1/16" 스테인레스 튜브 0.5 m를 냉각기(Cooler)로 이용하였다. 응축된 물은 분리기에서 분리하여 순수한 수소만 MFM(Mass Flow Meter)를 이용하여 측정하였다.

### 2.1.4 수소 발생 실험 결과

본 실험에서는 앞선 연구자의 연구결과<sup>(13)</sup>에 따라 pH 13 이상인 알카리 수용액에  $\text{NaBH}_4$ 를 용해하여 상온에서 오랫동안 저장 가능하고 촉매와 닿았을 때 빠르게 수소를 발생시킬 수 있도록  $\text{NaBH}_4$  20 wt% +  $\text{NaOH}$  5 wt% +  $\text{H}_2\text{O}$  75 wt%로 제작된 수용액을 사용하였다. 이 조건 하에서  $\text{NaBH}_4$  수용액 유량변화에 대한 수소 발생량, 촉매량에 따른 수소 발생량에 대해 실험을 수행하였다.

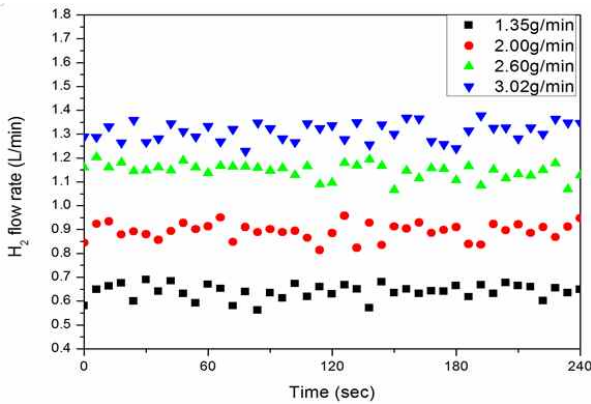


Fig. 3. Hydrogen generation rate versus  $\text{NaBH}_4$  aqueous solution supply rate

Figure 3 결과는 촉매량 3.4 g에서  $\text{NaBH}_4$  수용액 1.35 g/min부터 3.02 g/min까지 유량에 따라 수소 발생량이 변화된 결과이다. 20 wt%  $\text{NaBH}_4$  수용액 1 g에 발생하는 이론적 수소량은 0.513 L이며 이론적 수소 발생량과 비교했을 때 1.35 g/min에서 0.693 L/min이 발생되어야 하므로 90~100 %의 수소 전환효율을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Figure 3 실험결과의 수소 전환율을 모두 확인해보면  $\text{NaBH}_4$  수용액 공급유량 2 g/min에서 수소 전환율 85~95 %, 2.6 g/min 80~90 %, 3.02 g/min 80~90 %를 진동한다. 결과적으로 공급유량이 높아질수록 수소 전환효율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4 는  $\text{NaBH}_4$  수용액 2.3 g/min일 때 촉매량 0.6 g ~ 7.6 g에서 수소 발생량의 변화를 측정한 결과이다. 촉매량은 Fig. 1 (c)에서 나타난 촉매의 길이를 절단하여 조절하였다. 실험결과 촉매량 0.6 g에서는 수소 발생량 0.65 L/min으로 평균 55 %의 낮은 수소 전환율을 보인다. 이 결과는 2.3 g/min의 속도로 유입되는  $\text{NaBH}_4$  수용액을 모두 수소로 변환시키기에 촉매량이 부족한 것으로 판단된다. 하지만 그 외의 촉매양에서 평균 수소 발생량 1.0 L/min으로 80~90 %의 전환율을 보여 일정양 이상의 촉매양에서 같은 전환율을 얻는 것으로 판단할 수 있다.

Figure 5 는 촉매량 0.6 g, 1.2 g, 2.7 g, 3.4 g, 7.6 g에  $\text{NaBH}_4$  수용액 0.6~3.2 g/min을 공급하여 실시간으로 얻어진 수소 전환율을 시간에 대해 평균을 취한 값이며 평균값으로부터  $\pm 5$  %의 변동량을 가지고 있다. 실험결과 0.6 g의 촉매에서는 매우 낮은 전환율을 보이는데 이것은 촉매의 길이가 짧아 지속적으로 공급되는  $\text{NaBH}_4$  수용액이 모두 수소로 변환되기 전에 유입되는

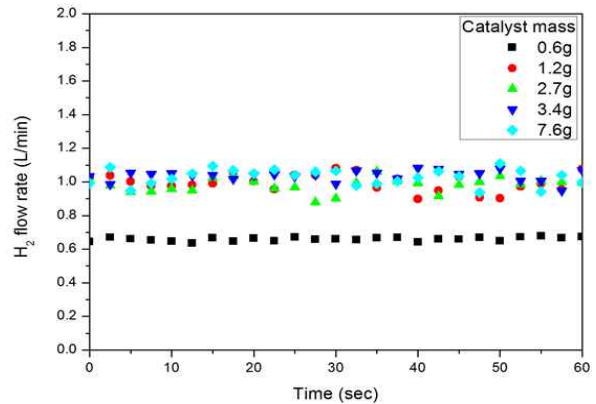


Fig. 4. Hydrogen generation rate versus catalyst mass

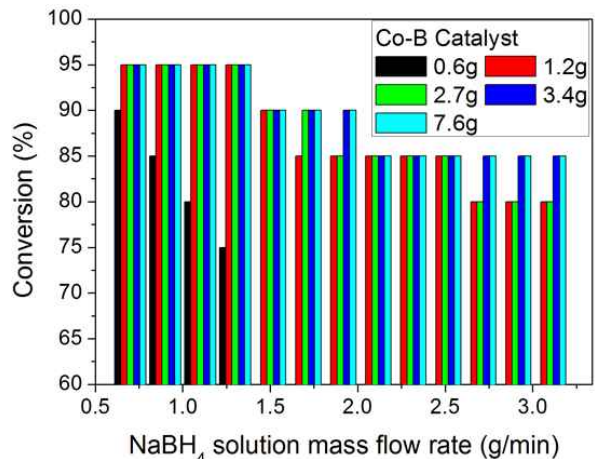


Fig. 5. Result of hydrogen conversion

$\text{NaBH}_4$  수용액에 밀려 미처 변환되지 않은 것으로 판단된다. 70 % 이하의 수소 변환율은 높은 전환율을 갖는 본 연구의 목적에 부합하지 않기 때문에 더 높은 유량에서 수행하지 않았다. 하지만 촉매량 1.2 g, 2.7 g, 3.4 g, 7.6 g은 낮은 유량일 때 높은 전환율(90 $\pm$ 5 % 이상)을 보이며  $\text{NaBH}_4$  수용액이 1.5 g/min 이상 공급되면서 점차적으로 전환율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.  $\text{NaBH}_4$  수용액 공급양 2 g/min 이상에서 촉매량이 1.2 g 보다 많다면 촉매량과 관계없이 85 $\pm$ 5 %의 수소 전환율을 확인할 수 있는데 이 결과는  $\text{NaBH}_4$  수용액의 수소 전환율은 촉매의 형상, 접촉 시간뿐만 아니라 환경의 온도와 압력에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 수소 발생기 촉매의 형상, 온도, 압력에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

## 2.2 PEM 연료전지 시스템 구성

본 연구에서는 연료전지 시스템을 무인항공기에 적용하기 위하여 경량의 100 W PEM 연료전

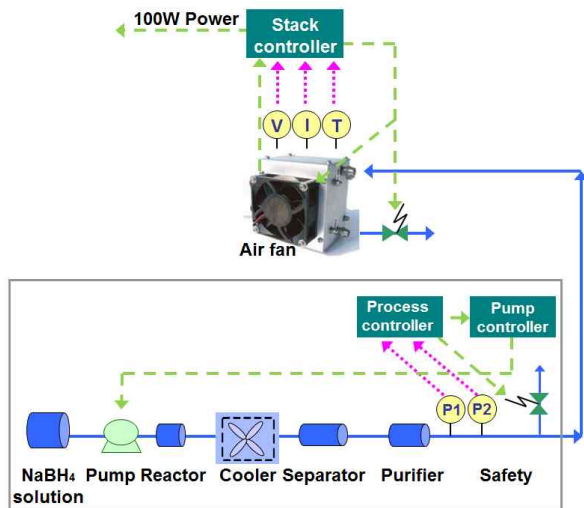


Fig. 6. Flow chart of fuel cell system

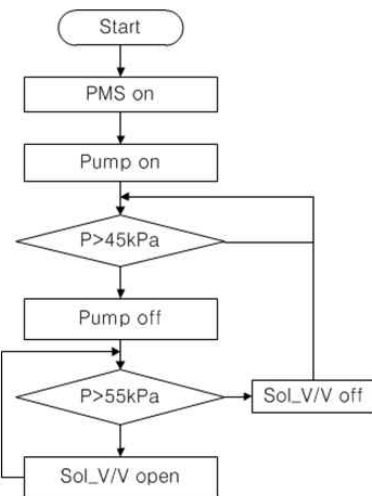


Fig. 7. Control logic of hydrogen generation controller

지를 사용하며 대기 중의 공기로부터 산소를 얻어 자가 가습이 가능한 Horizon Fuel cell 사의 H-100 연료전지 스택을 선택하였다. 또한 안정성, 경량화에 초점을 맞추면서 수소 발생량을 효율적으로 제어할 수 있도록 설계하였다(Fig. 6).

마이크로 펌프를 이용하여 NaBH<sub>4</sub> 수용액을 Co-B 촉매<sup>(7)</sup>가 있는 수소발생장치에 공급한다. 촉매 실험 결과 NaBH<sub>4</sub> 수용액은 70 °C 이상의 높은 온도에서 반응이 빠르게 일어나기 때문에 NaBH<sub>4</sub> 수용액의 반응열을 이용해 반응기의 온도를 높이지만, 물의 증발을 막기 위하여 최고온도는 100 °C 이하로 유지되도록 설계하였다. 기체를 제외한 액체 혹은 고체 생성물(NaBO<sub>2</sub>, NaOH, H<sub>2</sub>O)은 반응기에서 일차적으로 분리되고 발생한 수소 및 기체 상태로 존재하는 부산물은

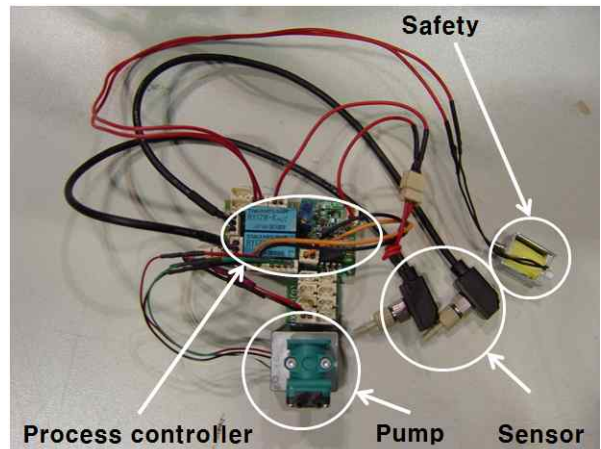


Fig. 8. Hydrogen generation control system

냉각기를 거치며 온도가 낮아져 분리기 및 정화기(Purifier)에서 이온 교환 수지 및 SAP(Super Absorbent Polymer)에 의해 분리된다. 분리된 순수한 수소는 압력 스위치 및 퍼지 밸브 등으로 구성된 수소 발생 제어장치를 거쳐 연료전지 스택에 공급된다.

### 2.3 수소 발생 및 연료전지 제어 방법

본 연구의 수소 발생장치는 효율적인 수소 발생을 위하여 수소 발생장치 내부의 압력을 이용하여 발생량이 제어된다. H-100 스택의 작동압력은 45 kPa이므로 수소 발생 제어장치의 내부 압력이 45 kPa 이상이 되면 촉매에 NaBH<sub>4</sub> 수용액을 공급하는 펌프의 작동을 멈춰 수소 발생을 억제하고, 45 kPa 이하가 되면 다시 펌프가 작동된다. 펌프작동이 멈춘 후에도 미반응 생성물에서 수소가 지속적으로 발생해 내부압력이 올라가 시스템을 손상하는 것을 방지하기 위하여 55 kPa 이상이 되면 솔레노이드밸브를 열어 강제 배출한다.

## III. 연료전지 시스템 안정성 실험

### 3.1 수소 발생 시스템 장시간 안정성 평가 실험 장치

연료전지 및 수소 발생 시스템의 장시간 운전 안정성 확보를 위하여 수소 발생 시스템이 중간에 문제가 발생하여도 스택의 연속운전이 가능하도록 압축수소 가스를 선택적으로 공급할 수 있는 지상 실험 장치를 구축하였다(Fig. 9).

장시간 운용을 위하여 반응기는 축적된 생성물을 배출할 수 있도록 설계하였다. 정확한 수소 발생량 측정을 위하여 질량유량계(MFM) 및 Wet

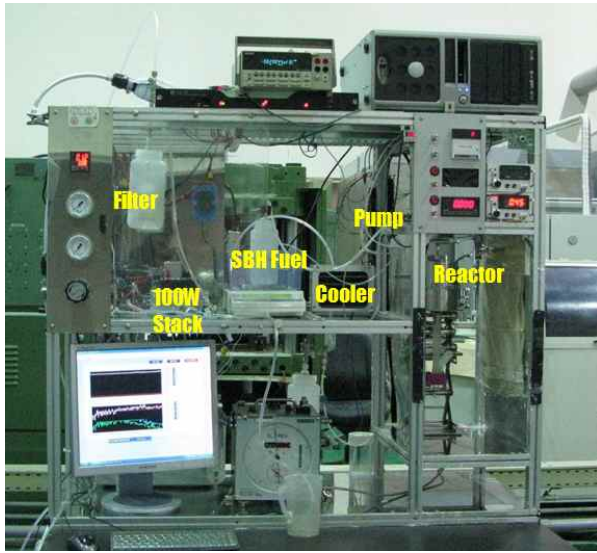


Fig. 9. Ground long time test bench

gas meter를 사용하여 유량을 측정, 비교하여 신뢰도를 높였다.

### 3.2 연료전지 시스템 장시간 실험 결과

수소 발생 제어 장치를 이용한 연료전지 시스템은 2.1.4절에서 언급한 촉매 및 공급 유량에 대한 수소 발생량 측정 결과를 토대로 촉매 3.4 g, 공급유량 3.2 g/min을 사용하여 실험을 수행하였다. 수소 발생 제어장치를 통해 NaBH<sub>4</sub> 수용액의 공급유량은 제어되므로 안정된 수소 공급을 위하여 100 W 운전에서 필요한 NaBH<sub>4</sub> 수용액 공급량인 3.0 g/min보다 7 % 높은 수치로 공급하게 되었다. Fig. 10. 은 본 연구팀에서 개발한 수소 발생 제어 시스템의 장시간 안정성을 확인한 결과이다. 로더(loader)의 전류제어를 이용하여 7 A, 100 W 고정으로 부하를 설정하였고 7 시간동안 수행 되었다. 초기 20분 동안 출력을 점차 증가시키며 연료전지를 활성화 시키고, 출력에 따라 수소 소모양(혹은 생성량)이 증가한다. 100 W 출력에서 연료전지의 소모 수소량은 1.4 L/min 이고 수소 유량에서 확인되는 큰 진폭은 스택 후단의 퍼지(purge)밸브가 10초에 한번씩 0.5초간 짧게 열리며 스택 수소극으로 확산된 물(H<sub>2</sub>O)을 제거할 때 측정된 값이다. 장시간 데이터 수집을 위하여 2초에 한번씩 데이터를 수집하였기 때문에 수소 유량이 랜덤하게 수집되어 크고 작은 진폭이 나타나지만 연료전지 시스템의 안정성을 평가하는 본 실험의 목적에는 크게 문제되지 않는 것으로 판단된다. 전체적으로 40 kPa 이상 50 kPa 이하에서 운전되며 안정된 출력을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 중간 중간에 압력 및 수

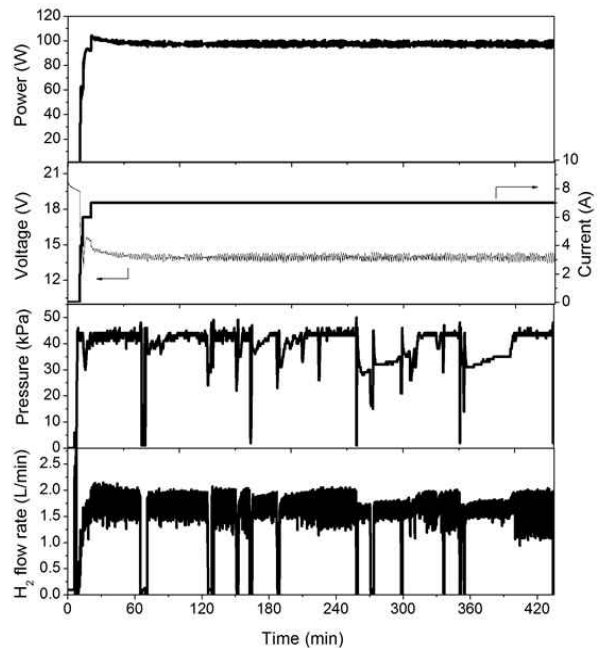


Fig. 10. 7 hours operation test of fuel cell system

소 유량이 떨어지는 문제는 NaBH<sub>4</sub> 수용액의 보충 및 생성물 배출시 발생한 것이며 배출 전에 압축수소 가스로 수소 공급 방법을 전환하여 수소 발생기에서 연료전지에 수소가 공급되지 않으므로 0 L/min으로 측정되었으며, 연료전지 운전 안정성에는 문제가 되지 않았다. 운전 시작 후 4 시간이 지나면서 촉매가 점차 지지체에서 떨어져 나가 소산되어 발생 효율이 감소해 압력이 점차 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 이에 따라 유입 연료량을 증가시켜 적정 압력을 유지하며 지속적으로 운전을 진행하였다. 그러나 유입 연료량이 많아진 것은 곧 수소 전환율이 낮아진 것을 의미하므로 1 회 운전 시 안정되고 효율적인 운전을 위하여 약 4 시간 이 적절한 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 소형 수소 발생장치를 이용한 연료전지 시스템을 무인항공기의 추진시스템으로 적용하기 위하여 안정되고 수소 전환 효율이 높은 수소 발생 제어 시스템을 설계하였다.

본 연구에서 설계된 수소 발생 시스템은 Co-B 촉매를 사용하며, 수소 발생량 측정 결과 발열반응으로 높아진 반응기 온도 때문에 물이 증발하여 가수분해반응을 하는 NaBH<sub>4</sub> 수용액의 수소 전환 효율에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 실험 결과 100 W 스택을 운전하기 위하여 필요한

최대 수소량 1.4 L/min을 높은 전환율로 발생하기 위하여 NaBH<sub>4</sub> 수용액 3.2 g/min, 촉매 3.4 g 이상이 필요한 것으로 확인되었다.

수소 발생 제어 장치는 발생장치 내부 압력을 이용하여 수소 발생량을 제어하며 45 kPa 이상에서 연료공급 펌프의 작동을 멈추고, 55 kPa 이상에서 퍼지(purge)밸브를 열어 내부 압력의 증가를 막는다. 실험결과 연료전지 모든 부하영역에서 수소 발생기가 안정된 내부 압력으로 작동되며, 안정된 출력을 확인하였다.

무인항공기 적용에 앞서 수행된 수소 발생 제어 시스템의 장시간 안정성 평가에서 7시간동안 안정된 성능을 보였지만 Co-B 촉매 손실에 의한 수소 변환 효율을 고려했을 때 최대출력으로 1회 사용 시 경제적 작동은 4시간이 적합하다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 교육과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- 1) Keun-Bae Kim, "Technical Trends for Fuel Cell Aircraft", Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol 7, Issue 2, 2009, pp. 85~105
- 2) AeroVironment's unmanned aircraft achieves record flight. Fuel Cell Bull, Vol 8, 2007
- 3) Moaad Yacoubi, Christophe Lemone, Antoine Bourguignon and Patrick Hendrick, "Study of the propulsion system of a VTOL MUAV using fuel cells", 9<sup>th</sup> National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels, 9-10-11, May 2012
- 4) "PRODUCTS-AEROPAK Fuel Cell Propulsion System for Unmanned Aerial Vehicles", Horizon Energy Systems, Web. 12 Feb. 2012
- 5) T.G. Kim, H.C. Shim, S. J. Kwon, "Small Fuel Cell System as a Power Source for Unmanned Aerial Vehicle", Korean Society for Precision Engineering, 2007 KSPE Spring conference, 2007, pp.733-734
- 6) Ji-seok Hong, Jin-Gu Park, Hong-Gye Sung, Seock-Jae Shin, Suk-Woo Nam, "Hydrogen generation control of PEMFC propulsion system for UAV," 2010 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2010.
- 7) Kyunghwan Kim, Taegy Kim, Kiseong Lee, Sejin Kwon, "Fuel cell system with sodium borohydride as hydrogen source for unmanned aerial vehicles", Journal of Power Sources, Vol 196, Issues 21, 1 November 2011. pp.9069-9075
- 8) Taegy Kim, Sejin Kwon, "Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft", International Journal of Hydrogen Energy 37, 2012, pp.615-622
- 9) Sun Ja Kim, Jaeyoung Lee, Kyung Yong Kong, ChangRyul Jung, In-Gyu Min, Sang-Yeop Lee, Hyoung-Juhn Kim, Suk Woo Nam, Tae-Hoon Lim, "Hydrogen generation system using sodium borohydride for operation of a 400W-scale polymer electrolyte fuel cell stack", Journal of Power Sources 170, 2007, 412~418, 2007
- 10) S.U. Jeong, R.K. Kim, E.A. Cho. H.-J. Kim, S.-W. Nam, I.-H. Oh, S.-A. Hong, S.H. Kim, "A Study on hydrogen generation from NaBH<sub>4</sub> solution using the high performance Co-B catalyst", Journal of Power Sources, Vol. 144, Issue 1, 1 June 2005, pp.129~134
- 11) Jin-ho Kim, "A study on the Hydrogen Storage/Production from Hydrolysis of Sodium Borohydride and Development of Direct Borohydride Liquid Fuel Cell", 2004, Ph.D thesis, KAIST
- 12) Kreevoy MM, Jacobson RW, "The rate of decomposition of NaBH<sub>4</sub> in basic aqueous solution", Ventron Alembic 15, 1979, pp2~3