

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.9.858>

연료전지 항공기를 위한 고체상태 NaBH₄의 수소발생 및 연료전지 구동 특성

이충준*, 김태규**

Characteristic of Hydrogen Generation from Solid-State NaBH₄ and Fuel Cell Operation for Fuel Cell Aircraft

Chung Jun Lee* and Taegy Kim**

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of hydrogen generation from solid-state NaBH₄ and fuel cell operation for fuel cell aircraft. The solid-state NaBH₄ was used for a high hydrogen storage density, and was reacted with hydrochloric acid to generate hydrogen. The hydrogen generation rate for the solid-state NaBH₄ reaction was measured at various conditions. As a result, the hydrogen generation rate was increased with the feed rate and concentration of hydrochloric acid, while not be affected by the reaction temperature. A fuel cell was connected with the solid-state NaBH₄ hydrogen generator. The stable power output was obtained at the gradual and sudden increases of electric loads.

초 록

본 논문은 연료전지 항공기를 위한 고체상태 NaBH₄의 수소발생 및 연료전지 구동 특성에 대해서 기술하고 있다. 수소 저장밀도를 높이기 위해서 고체상태 NaBH₄와 염산을 반응시켜 수소를 발생시키는 방법을 사용하였다. 다양한 반응 조건에서 고체상태 NaBH₄의 수소 발생률을 측정하였다. 고체 NaBH₄의 수소 발생률은 염산의 주입속도와 농도에 영향을 받지만, 환경온도에 영향을 받지 않는 것을 확인하였다. 연료전지를 고체 NaBH₄ 수소 발생기에 연결하였다. 전기적 부하가 서서히 혹은 급격히 증가하여도 안정적인 출력을 유지하는 것을 확인하였다.

Key Words : Fuel Cell Aircraft(연료전지항공기), Sodium Borohydride(수소화붕소나트륨), Hydrochloric Acid(염산), Solid State NaBH₄(고체상태 NaBH₄)

1. 서 론

1839년 윌리엄 그로브에 의해 처음으로 수소 연료전지가 소개되어 20세기 초를 거쳐 그 개념

이 확립되었다. 그 후 20세기 중반에 이르러서야 인류의 새로운 도전, 우주개척을 통해 연료전지의 숨겨진 가능성이 발견되지만 당시 풍부하고 인프라가 잘 구축된 화석연료로 인하여 연료전지는 특수 분야를 제외하고는 관심대상에서 멀어지게 된다. 하지만, 시간이 흘러 인류는 고갈되어 가는 화석연료와 지구환경과의 공존이라는 새로운 과제를 끌어안게 되었고, 이에 대한 돌파구로 연료전지의 높은 에너지 효율과 수소를 사용하는 친환경적인 특성을 재조명하게 된다.

† 2010년 11월 29일 접수 ~ 2011년 8월 27일 심사완료

* 정회원, 조선대학교 항공우주공학과 대학원

교신저자, E-mail : sadnesseye@paran.com

광주광역시 동구 서석동 375번지

** 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

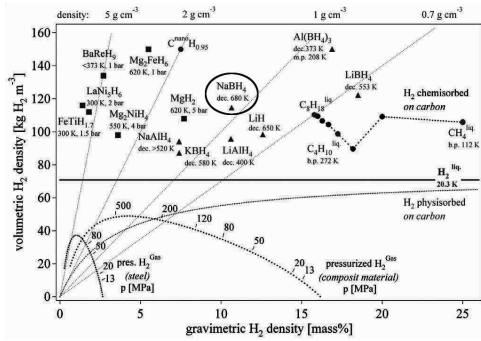


그림 1. 각종 저장 방법에 따른 체적 및 중량대비 수소저장 밀도^[1]

연료전지는 기계적 에너지 전환을 거쳐야하는 연소 기관을 통한 에너지 전환과는 달리 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하기 때문에 중간과정에서 발생하는 손실이 적어 매우 높은 에너지 효율 특성을 가지는 에너지 변환장치이다.

항공 우주 분야에서도 이러한 고효율 특성을 바탕으로 2000년도 중반부터 무인기를 중심으로 연료전지의 적용에 대한 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있고, 2009년 6월 싱가포르에서는 장시간 비행을 위한 9시간급의 항공연료전지가 상용화되어 시장에 출시된 상태이며, 국내에서도 조선대학교 및 KAIST에서 장시간 비행용 연료전지 무인기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[2, 3]

연료전지를 탑재한 항공기의 장시간 비행 성능 혹은 비행효율을 증가시키기 위한 최선의 방법으로는 에너지 저장 밀도를 높이는 방법이 가장 활발하게 연구되고 있는데, 현재까지 연료전지에 주로 사용되는 수소의 저장방법을 살펴보면 액화저장, 고압저장, 수소 저장 합금을 이용한 저장 방법을 들 수 있다. 이는 모두 위험성 혹은 부수적인 시스템으로 인한 무게 증가, 단가 및 유지비 상승과 같은 문제가 뒤따르기 때문에 항공기에 적용하기에는 적절한 해답이 라고 할 수 없다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 근래 들어 NaBH₄(Sodium Borohydride, 수소화붕소나트륨)라는 수소화물이 주목을 받고 있다.

NaBH₄는 그림 1에서 보는 바와 같이 무게대비 10.6%라는 높은 수소 저장밀도를 자랑하며, 상온에서 고체로 존재하기 때문에 취급이 용이하고, 여타 수소화물에 비해서 발화점이 높아 보다 안전하며, 가수분해를 거쳐 수소를 방출하는 특성을 가진다. 이러한 장점으로 인하여 NaBH₄는 매우 발전 가능성이 높은 수소 저장원이라고 할

수 있으며, 현재 이를 수용액으로 저장하여 촉매와 반응시켜 수소를 발생시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[2, 3] 하지만, NaBH₄의 용해도에는 한계가 존재하고, 촉매 제작 및 수용액 제작 과정이 추가로 요구되기 때문에 준비 시간과 비용 상승하는 문제를 내포하게 된다. 또한, 수용화로 인하여 물이 많이 요구되기 때문에 수용화에 사용된 물에서 수소를 모두 분해할 수 없다면, 시스템 에너지 밀도 저하로 인한 손실이 발생하게 된다. 따라서, 별도의 상태변화를 거치지 않고 고체상태의 NaBH₄에서 바로 수소를 얻을 수 있다면 앞서 나열한 단점만이 아닌, 추가적으로 요구되는 구성품의 최소화로 인하여 시스템의 단순화 및 경량화가 가능해지므로 항공기에 있어서 큰 장점으로 작용하게 될 것이다.

뿐만 아니라 현재 국내/외적으로도 고체상태의 NaBH₄를 그대로 사용하는 방법에 대한 연구는 보고되지 않고 있기 때문에 본 연구를 통하여 고체상태의 NaBH₄에서 수소를 얻는 방법과 그에 따른 수소 발생 성능 변수와 더불어 이를 통한 연료전지의 구동 가능성, 기본적인 작동 특성을 확인하여 고체상태의 NaBH₄를 직접 이용하여 수소 저장밀도를 높이는 방법과 연료전지 항공기에 적용을 위한 연구의 기본 방향에 대해 제시하고자 한다.

II. 실험

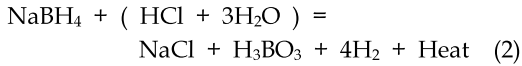
2.1 염산을 이용한 NaBH₄의 가수분해

고체상태의 NaBH₄는 가수분해 반응을 통하여 4몰의 수소와 열을 방출하게 되며, NaBO₂를 반응 결과물로 내놓게 된다.



하지만, 이는 어디까지나 물을 이용한 이론상의 반응이며, 실제로 고체상태의 NaBH₄에 물을 떨어뜨리는 방식의 반응기를 이용한 실험에서는 약 35%정도의 수소만이 분해되어 방출되는 것으로 알려져 있다. 이는 발생된 수소의 차원에서 접근하면 매우 큰 손실이라고 할 수 있으며, 효율 측면에서도 좋은 방법이라고 할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 NaBH₄의 물질적 특성 측면에서 접근해보면, NaBH₄는 염기성 용액에는 안정적이지만, 산성 용액에서는 쉽게 분해되어 수소를 방출한다는 사실을 확인할 수 있다. 특히, 산성 용액 중에서도 3N 농도의 염산(Hydrochloric Acid, HCl)을 1μl/min의 속도로

주입시켜 고체 NaBH₄와 반응시키면 이론상 가수분해 반응대비 97%의 수소를 분해한다고 알려져 있다.^[4]



고체상태의 NaBH₄와 염산의 이론상 가수분해 반응은 위와 같으며, NaBH₄가 쉽게 분해되기 위한 낮은 pH 조건을 만들어 주기 때문에 매우 빠르고 높은 수소 분해율을 보여줄 것이라고 예측해볼 수 있다.

하지만, 염산을 주입하여 반응시키는 것은 화학반응이기 때문에 염산의 주입속도 및 농도, 환경온도 변화와 같은 주변요소에 의해 수소발생 성능이 변화할 것이라고 예측해 볼 수 있지만, 이 변화량에 대해서는 정확하게 알려진 바가 없다. 이는 이 반응 메커니즘을 이용하여 연료전지 시스템을 구성할 경우 주변 요소에 따른 수소 발생량 변화라는 위험요소를 내포하게 되므로 이를 밝혀내기 위한 실험을 먼저 수행하기로 하였다.

2.2 수소 발생 실험

염산과 NaBH₄의 반응은 앞서 거론한 것처럼 화학반응이므로 염산의 주입속도와 농도, 그리고 환경온도에 영향을 받을 것이라고 예측할 수 있으며, 이에 대한 검증과 변수에 따른 수소발생량을 정량적인 수치로 측정하기 위해 그림 2의 (A) 항목과 같이 실험 장비를 구성하였다.

수소 발생 실험장비는 주입장치, 반응기, 반응기 주변 온도 조절기, 수분제거기, 유량 측정기(Omega FMA-1605 : Accuracy ± 0.8% of rdg + 0.2% FS, Differential Pressure Type), 온도 센서(Thermocouple, K-Type)를 이용하여 구성하였으

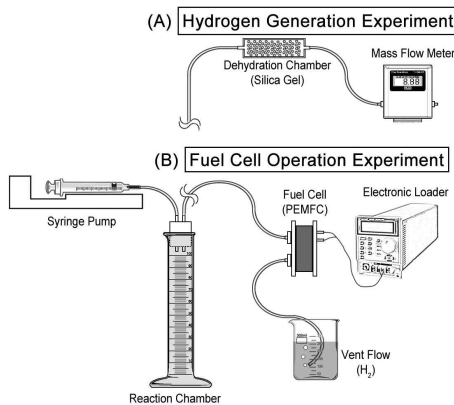


그림 2. 고체 NaBH₄를 이용한 연료전지 구동 실험장비

며, 실험 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 모든 실험은 표준 실험실 환경(Standard Laboratory Conditions, 25℃, 100kPa)하에서 고체 알갱이 상태(Granular Type)의 NaBH₄ 0.1g을 100ml 용적의 매스실린더(Graduated Cylinder)에 넣고, 1ml의 염산을 위에서 떨어뜨리는 방식으로 진행하였다.

본 논문에는 정량적인 수치만을 수록할 목적으로 작성하였기 때문에 본문에는 수록하지 못하였지만, 사전 검증 실험에서 물 치환방식(Water Displacement)을 통해 측정한 결과, 알갱이 형태와 분말(Powder) 형태 NaBH₄의 수소 분해성능이 차이가 없음을 확인하였기 때문에 보다 취급이 용이한 알갱이 타입의 고체 NaBH₄를 이용하여 모든 실험을 진행하였다. 또, 정량적인 측정 실험을 진행하기에 앞서 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography)를 수행한 결과 발생한 가스가 순수 수소임을 확인하였다. 이외에도 사용된 염산의 농도는 노르말 농도(N, Normality)로 표기하였으며, 1, 2, 3N의 염산용액은 일반적으로 사용하는 농도로는 3.09%, 6.18%, 9.27%의 묽은 염산을 의미한다.

2.3 연료전지 구동 실험

연료전지 구동 실험은 기본 작동 특성 확인 및 비교/검증으로 구성하였으며, 그림 2의 (B) 항목에서 볼 수 있듯이 주입기, 반응기, 연료전지, 전자로더 등을 이용하여 실험을 수행하였다. 여기서 사용된 연료전지는 연료전지 피독^[5] 및 기타 발생할 수 있는 위험요소를 고려하여 선정하였다.

연료전지 구동 실험도 앞선 실험과 동일하게 표준 실험실 환경조건에서 진행하였고 수소 발생기에는 알갱이 상태의 고체 NaBH₄와 3N 농도의 염산을 사용하였으며, 비교실험에서는 고압 저장용기에 저장된 수소를 Mass Flow Controller를 이용하여 수소 발생기와 유사한 유량을 공급하여 진행하였다.

III. 결과 및 토론

3.1 염산 주입속도에 따른 수소발생

염산의 주입속도에 따른 수소 분해성능을 확인하기 위해 2N 농도의 염산을 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 120ml/h의 속도로 각각 주입하여 발생한 수소의 양을 측정하는 방식으로 실험을 진행하였으며, 그 결과를 표 1과 그림 3에 정리하였다.

표 1. HCl 주입속도에 따른 수소 발생률

속도 (ml/h)	발생량(ml)	발생율 (%)
1	185.72	72.16
3	203.79	79.18
5	253.72	98.57
10	239.90	93.21
20	276.98	107.61
40	278.38	108.16
60	310.21	120.52
120	310.19	120.51

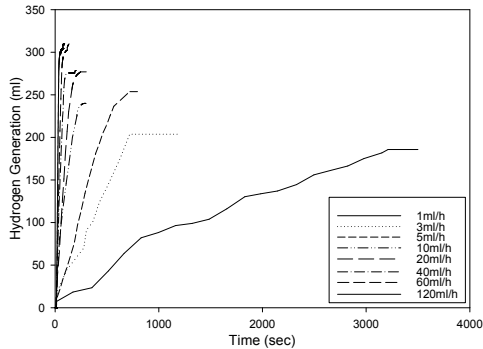


그림 3. HCl 주입속도에 따른 수소 발생량

모두 같은 양의 염산을 사용하여 주입속도만 변화시킨 결과이기 때문에 염산의 주입속도에 따라서 수소 발생량이 정비례 관계에 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 특정 주입속도 이상이 될 경우 가수분해 반응을 기준으로 수소발생량이 100%가 넘어가는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 물 치환방식으로 측정할 경우에도 동일한 결과를 확인할 수 있었으며, 이는 이론 반응식을 기준으로 생성되었어야 할 붕산(H₃BO₃) 이 실제 반응에서 제대로 형성되지 못하였기 때문에 추가적인 수소가 발생하였다는 것을 반응 결과물의 XRD 및 EDS 분석 결과에서 확인할 수 있었다. 이에 대한 자세한 메커니즘 및 반응식에 대해서는 차후 보다 자세한 실험을 구성하여 밝혀낼 예정이다.

일정 주입속도 이하에서는 분해효율이 급격히 떨어지는 측면을 확인할 수 있었는데, 이러한 물은 염산과 NaBH₄를 이용한 수소 공급 시스템을 구축하여 연료전지 시스템을 항공기에 적용할 경우 일정 이상의 주입속도를 필수적으로 요구하게 된다고 해석할 수 있다. 하지만, MAV와 같이 기체의 부피가 작을 경우 비행시간에 비례하여 많은 염산과 NaBH₄가 요구되므로 수소 저장 밀도 측면에서는 큰 손실이 발생하게 된다. 이러한 문

제를 해결하기 위해서는 낮은 염산 주입속도에서도 높은 수소 분해효율 특성을 가져야하기 때문에 해당 변수를 찾아내기 위한 방법으로 농도에 변화를 주어 수소 발생률을 측정하는 실험을 다음과 같이 진행하였다.

3.2 염산 농도에 따른 수소발생

앞선 실험에서 일정속도 이하의 주입속도에서는 고체상태의 NaBH₄수소 분해 성능이 떨어지는 것을 확인하였고, 이를 해결하기 위하여 동일한 주입속도를 기준으로 염산의 농도를 변화시켜 수소 분해 성능이 변화하는지 확인하는 실험을 수행하였다.

실험은 이전과 동일한 양의 염산과 NaBH₄를 이용하였으며, 3, 20, 60, 120ml/h의 주입속도에 대해 취급상 안전을 고려하여 1, 2, 3N 농도의 묽은 염산만을 이용하여 그 성능차이를 확인하는 방식으로 진행하였다.

염산 농도에 따른 수소 분해성능은 표 2와 그림 4에 정리하였으며, 주입되는 염산의 농도가

표 2. HCl 농도에 따른 수소 발생률

농도 (N)	주입속도 (ml/h)	발생량 (ml)	발생율 (%)
1N	3	92.34	35.88
	20	108.37	42.10
	60	145.60	56.57
	120	268.01	104.13
2N	3	203.79	79.18
	20	276.98	107.61
	60	310.21	120.52
	120	310.19	120.51
3N	3	238.54	92.68
	20	332.32	129.11
	60	346.48	134.61
	120	378.62	147.10

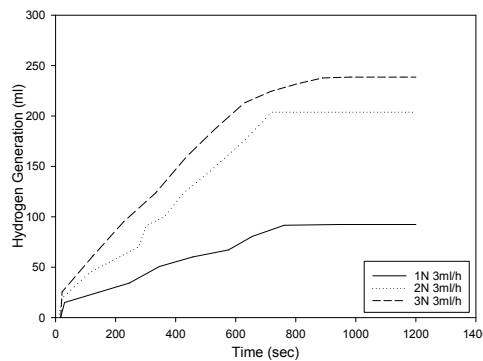


그림 4. HCl 농도에 따른 수소 발생량

높아질수록 분해 성능이 적게는 13.5%에서 많게는 65.51%까지 향상됨을 확인할 수 있었다. 특히, 3N 농도의 염산을 사용할 경우 3ml/h의 낮은 주입속도에서도 92.68%라는 높은 수소 분해 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과를 미루어 볼 때, MAV와 같은 부피가 작은 항공기에 고체 NaBH₄와 염산을 이용한 연료전지 시스템을 탑재할 경우, 혹은 장시간 구동이 요구되는 연료전지 항공기에는 보다 높은 농도의 염산을 사용하면 수소 저장밀도가 높아져 장시간 구동이 가능해질 것이라고 판단된다.

3.3 환경온도에 따른 수소발생

지금까지 염산의 주입속도 및 농도에 의한 수소 발생 성능의 변화를 확인하였으나, 이는 모두가 수분해라는 화학반응이며, 일반적으로 화학반응은 주변 온도에 영향을 받게 된다고 알려져 있다. 그리고 본 연구 목표 대상인 항공기의 운용 특성을 고려해보면, 항공기 내부에서 발생하는 열, 태양의 복사열과 같은 환경 온도라는 요소에 항상 노출되어 있기 때문에 이에 대한 영향을 확인하는 실험을 수행하였다.

환경온도에 따른 변수를 확인하기 위한 실험은 NaBH₄가 저장되는 반응기 주변 온도를 염산의 취급상 안전을 고려하여 선정된 25, 40, 55, 70°C의 온도로 유지시킨 후, 1, 2, 3N 농도의 염산을 이용하되, 자체 반응열에 의한 영향을 줄이기 위하여 3ml/h의 낮은 염산 주입속도로 실험을 진행하였다.

실험 결과는 그림 5에서 볼 수 있듯이 온도에 따른 영향을 확인할 수 없었다. 본 논문에는 수록하지 않았지만 1N과 3N의 염산을 이용한 결과에서도 온도에 따른 경향성을 확인할 수 없었다. 경향성은 없지만, 최종 발생량은 최대 50ml 가량 차이가 발생한 부분을 볼 수 있는데, 이는

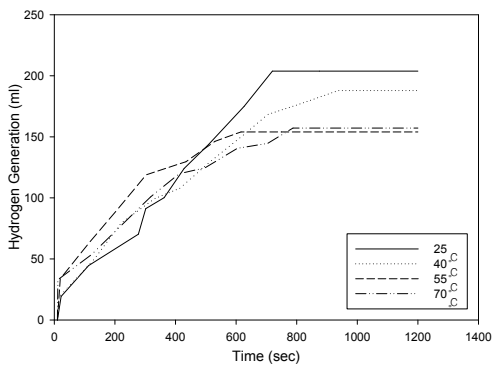


그림 5. 환경 온도에 따른 수소 발생량

염산을 원통형 관(Tube)을 이용하여 주입하였기 때문에 발생한 표면장력으로 인하여 0.05~0.15ml의 미세한 주입량의 차이가 만들어낸 오차로 확인되었다. 따라서, 이 문제를 보다 명확하게 확인하기 위해 반응량을 늘려 실험을 수행한 결과 온도에 따른 영향을 살펴보기 힘들다는 것을 다시금 재확인할 수 있었다.

3.4 연료전지 기초 구동

연료전지 구동실험에 앞서, 전지 자체의 기본 구동 특성을 파악하기 위해 고압 수소 저장용기에서 수소를 공급하여 그 특성을 확인해 보았다. 실험은 약 1W의 출력을 20분 이상 유지하는 수소 유량을 확인하는 형태로 진행하였으며, 작동 결과 중 하나를 그림 6에 정리하였다. 수소가 16ml/min 이상의 속도로 공급될 경우 20분 이상 1W를 유지할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 과부하와 같은 문제로 출력이 0으로 떨어지는 문제가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

또한, 약 1W의 출력을 유지시키기 위해서는 0.25A의 부하(Load)가 필요하지만, 약 4~5V의 전압이 강하가 발생하며 시간의 흐름에 따라서 지속적으로 출력저하가 발생하는 특성을 확인할 수 있었다.

3.5 수소 발생기를 이용한 연료전지 구동

앞선 실험에서 수소 발생 성능이 환경온도에 영향을 받지 않음을 확인하였기에 수소 발생기에서 온도 유지 장치를 제거하였다. 수소 발생기에서는 고체 NaBH₄ 0.5g에 3ml의 염산을 5ml/h의 속도로 주입하여 수소를 발생시켜 연료전지에 직접 공급하였다. 연료전지는 3.4절 연료전지 기초 구동실험과 동일하게 시작과 동시에 0.25A의 부

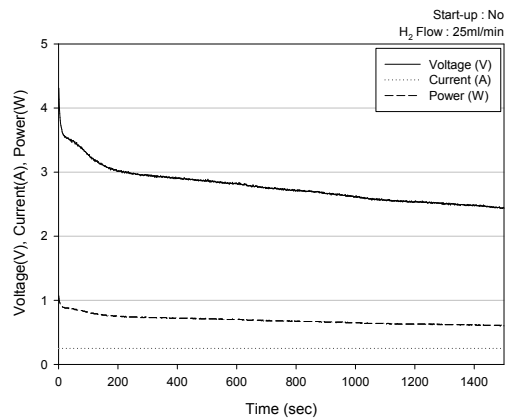


그림 6. 0.25A 인가에 따른 연료전지 작동 특성 (수소 공급원 : 고압 저장용기)

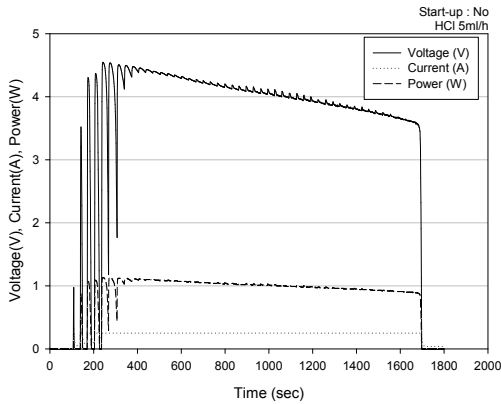


그림 7. 수소발생기를 이용한 연료전지의 기본 구동 특성 (시동과정 없음)

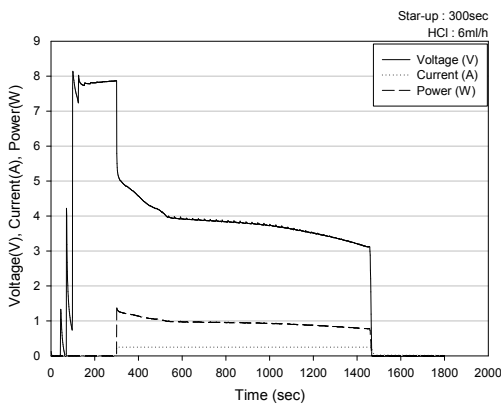


그림 8. 수소발생기를 이용한 연료전지의 기본 구동특성 (시동과정 300초)

하를 지속적으로 인가하는 형태로 30분간 구동하였으며, 그 결과를 그림 7에 정리하였다.

초반을 제외한 전반적인 작동특성은 양호하였지만, 실험 초반인 0~400초 구간에서 전압 및 출력 불안정이 매우 심하게 발생하는 현상이 발견되었다. 이 불안정한 출력은 400초 이후에는 크게 줄어들었지만 미세하게 남아 종료될 때까지 미세하게 지속되는 것을 확인할 수 있었다. 이 불안정한 원인을 조사해본 결과 초반 수소 공급 불안정이 원인으로 판단되었고, 이를 검증하기 위하여 약 300초의 시동과정(Start-up)을 추가하여 초반 수소 공급을 원활하게 한 이후 0.25A의 부하를 인가하는 형태로 실험을 수행하였다. 결과는 그림 8에서 볼 수 있듯이 시동과정 이후 부하가 인가되면, 초반 출력 불안정이 사라지고 이후에도 안정적으로 출력이 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

3.6 가변 부하에서 연료전지 구동 특성

앞서 수행한 기본 구동 실험들은 모두 인가하는 부하가 변동되지 않는 조건에서만 수행되었으며, 이 경우 구동에 큰 문제가 없다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 항공기의 동력원으로 사용할 경우 다양한 형태로 부하가 변화되는 경우가 발생하기 때문에 이를 기반으로 가변부하 조건에서의 구동 특성을 확인하는 형태의 실험을 구성하였다. 부하를 변화시키는 실험은 순차적으로 부하를 증가시키는 형태와 급격하게 부하를 증가시키는 형태로 진행하였다.

순차적으로 부하를 증가시키는 실험은 초반 300초 시동과정 종료 후, 0.05A씩 총 5번에 걸쳐 부하를 증가시키는 형태로 진행하였으며 그 결과를 그림 9에 정리하였다. 부하가 높아짐에 따라서 전압강하가 발생하였지만 안정적인 출력이 꾸준히 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

순차적인 부하 증가가 아닌 급격한 부하 증가, 항공기를 예로 들면 급격하게 스로틀을 높이는

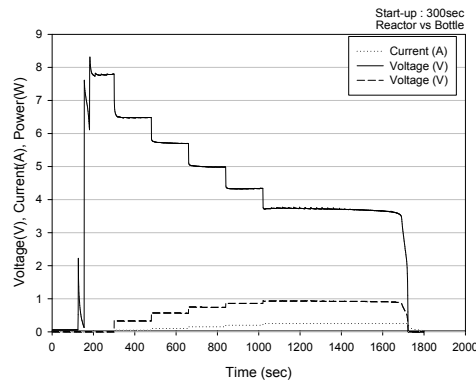


그림 9. 수소 발생기를 이용한 연료전지의 가변부하 특성 (순차적 부하 증가)

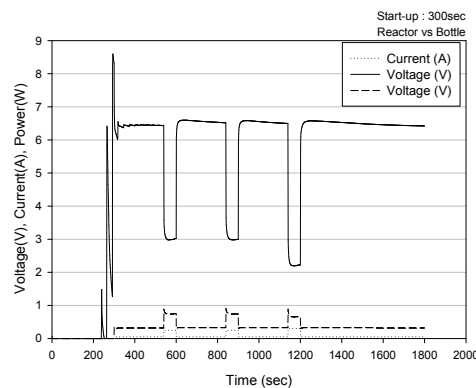


그림 10. 수소 발생기를 이용한 연료전지의 가변부하 특성 (급격한 부하 증가)

상황 등을 가정한 실험을 앞선 실험과 동일한 조건에서 수행하여 그림 10에 정리하였다. 실험은 연료전지에 시동과정 이후 0.05A의 부하를 지속적으로 인가하되, 주기적으로 0.25A로 급격히 부하를 증가시키고 최종적으로 0.3A의 부하를 인가한 결과이다. 급격하게 부하가 증한 경우도 앞서 수행한 순차적인 부하 증가 실험과 비교하면, 최대 1V정도의 추가적인 전압강하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 전압강하를 제외하고는 전반적으로 안정적인 출력이 유지되는 것을 확인할 수 있었지만, 실제 시스템으로 구성될 경우 급격한 전압강하로 인하여 전체적인 출력이 저하되는 상황을 불러오는 바람직하지 못한 결과가 일어날 수 있기 때문에 해결책을 찾고, 수소 발생기의 성능을 검증하기 위한 실험을 추가로 수행하였다.

3.7 수소 발생기 성능 비교 실험

앞선 실험에서 부하 증가에 따른 전압 강하 현상을 확인할 수 있었지만, 이는 연료전지의 구동 원리에서 발생하는 기본적인 특징이라고 널리 알려져 있다. 때문에 전압강하 현상을 제거하는 것보다 이를 줄이는 것이 보다 좋은 해답이라고 할 수 있기 때문에 이에 대한 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 측면에서 먼저 접근하여 실험을 구성하였다.

반응기를 이용한 수소 공급 특성을 살펴보면 수소 발생실험의 환경온도 부분에서 일부 거론한 것처럼 염산이 공급관의 표면장력으로 인하여 약 0.1~0.2ml가 일정 주기로 NaBH₄ 위에 떨어지게 되며, 그 순간마다 급격하게 수소가 발생하여 연료전지로 공급된다. 이는 연료전지에 공급되는 수소 공급유량이 과/부족을 주기적으로 반복하는 형태를 이루어 공급량이 과할 경우 많은 양의 수소가 외부로 배출(Vent)되어 연료전지가 실제 사용하지 못하고 버려지는 수소가 발생한다고 할 수 있다.

이러한 요소를 제거한 비교 대상으로 안정적인 수소 공급원으로 고압 수소 저장용기에서 공급된 수소를 유량 제어를 통해서 공급량을 일정하게 유지시키는 방법으로 3.6절의 가변부하 실험과 동일하게 연료전지를 구동하였고, 순차적인 부하 및 급격한 부하에 대한 결과를 각각 그림 11과 그림 12에 정리하였다.

비교 결과를 출력 유지 및 작동 특성 측면에서 살펴보면 전반적인 특성은 큰 차이를 확인할 수 없었으며, 수소 발생기 최적화와 같은 요소가 고려되지 않고 개념 검증 실험을 위해 구성된 것을 감안하면, 충분히 안정적으로 작동하는 것을

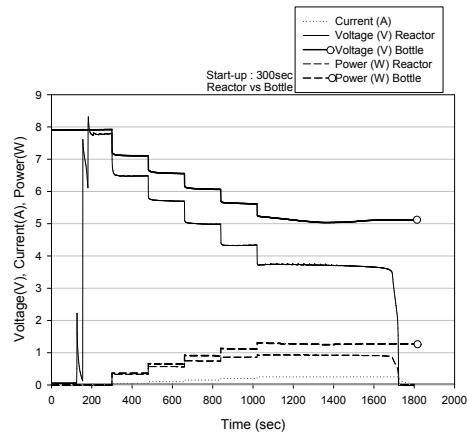


그림 11. 구동 특성 비교 (순차적 부하 증가)

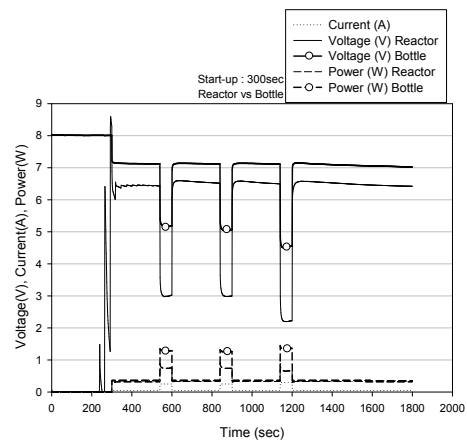


그림 12. 구동 특성 비교 (급격한 부하 증가)

확인할 수 있었다. 하지만, 부하가 높아질수록 수소 발생기를 사용한 결과보다 안정적인 수소 공급원을 이용한 결과에서 더 높은 출력과 상대적으로 낮은 전압강하가 발생한다는 것으로 미루어 볼 때, 앞서 예상했던 수소 공급 특성이 원인이 되었다고 말할 수 있다.

따라서, 이를 이용한 시스템을 구성하기에 앞서 수소 공급 유량의 최적화가 필요하다고 판단되는 바이며, 고체상태의 NaBH₄와 염산의 주입 속도를 조절하거나 과공급 등으로 인하여 배출되는 수소를 제어하는 방법을 이용한 유량제어 최적화실험을 차후 수행할 예정이다.

IV. 결 론

수소 연료전지 항공기의 체공시간 향상 및 비행효율 증가를 위해 연료원인 수소의 저장밀도를

높이는 방법에 대해서 기초 연구 및 검증을 수행하였다.

수소 저장밀도를 높임과 동시에 보다 저렴하고 간편한 시스템을 구성 방법으로 하나로 고체상태의 NaBH₄에 묶은 염산을 반응시켜 수소를 분해하는 방법을 제시함과 더불어 이에 대한 수소발생 성능변수를 제시하였다. 묶은 염산을 이용하면 수소 발생 성능은 염산의 주입속도, 농도에 정비례하여 증가하는 것을 확인하였지만, 반응로 주변 환경온도에 대해서는 영향을 받지 않음을 확인하였다. 또한, 영향을 주는 요소에 대해서는 그 정도에 대한 정량적인 수치를 제시함으로써 이를 이용한 수소 유량제어 방법의 기본 방향을 제시하였다. 수소 저장밀도의 경우, 3N 농도의 묶은 염산을 120ml/h의 속도로 주입할 경우에는 물을 이용한 완벽한 가수분해 반응에 비해서 약 147%의 높은 수소 발생율을 확인하였으며, 이는 단위 무게당 수소 저장밀도를 높이는 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

연료전지 구동 실험에서는 고체상태의 NaBH₄와 3N농도의 묶은 염산을 반응시켜 발생된 수소만 이용한 경우에도 연료전지가 문제없이 잘 구동됨을 확인할 수 있었으며, 전반적인 작동특성에 있어서도 과부하 및 연료전지 피독과 같은 큰 문제점이 발견되지 않음을 검증할 수 있었다.

고체 NaBH₄ 수소 발생기와 안정적인 수소 공급원의 성능 비교 실험에서는 전압 강하와 상대적으로 다소 낮은 출력 문제가 수소 발생기에서 발견되었지만, 이는 제대로 된 시스템 구성 및 최적화를 통하여 연료전지에 공급되어지는 수소 공급 효율을 개선 가능하기 때문에 해결될 수 있다고 판단된다.

이와 같은 결론들을 바탕으로 고체 NaBH₄와 염산을 이용하여 수소를 공급하는 연료전지 시스템을 구성하여 항공기 적용할 경우, 기존의 수소 연료전지 항공기에 비해 비교적 간단한 장치들로 구성이 가능하며, 촉매 및 추가적인 수소의 가공/저장 비용이 들지 않기 때문에 보다 저렴한 가격으로 안전한 구성이 가능할 것이라고 생각된다. 또한, 가격과 안전만이 아닌 시스템의 경량화에도 영향을 주어, 고효율 동력원으로써 항공기 체공시간 향상에 큰 도움이 될 것이라고 판단하는 바이다.

참고문헌

- 1) A. Züttel., "Materials for Hydrogen Storage", *materialstoday*, Sept. 2003, pp. 24-33.
- 2) 김태규, 이기성, 권세진, "연료전지 무인 항공기 설계 및 시험 결과", *한국항공우주학회 2009년도 춘계학술대회*, 2009, pp. 508~511.
- 3) 김태규, "소형 연료전지 무인기용 수소발생 장치의 성능시험", *한국수소및신에너지학회*, 2010년도 춘계학술대회, 2010, pp. 126-129.
- 4) S. Murugesan and V. Subramanian, "Effects of acid accelerators on hydrogen generation from solid sodium borohydride using small scale devices", *J Power Sources*, 187 2009, pp. 216 - 223.
- 5) Moore JM, Adcock PL, Lakeman JB, et al. "The effects of battlefield contaminants on PEMFC performance", *Journal of Power Sources*, 85(2), 2000, pp. 254-260.