

논문 요약

소형 무인기의 장기체공을 위한
청정에너지 동력시스템 개발

Development of Green Energy Power System for
Long Flight Small Unmanned Aerial Vehicle

1. 연구배경

운용의 효율성 때문에 감시 정찰 및 정보 수집을 목적으로 하는 소형 무인기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 세계 각국에서 다양한 무인기가 개발되어 운용되고 있다. 그러나 일반적인 무인기의 운용 시간은 1 시간 정도로 매우 제한적이다. 따라서 무엇보다도 임무수행 시간과 직결되는 동력 시스템의 에너지 밀도 증가가 가장 시급하다고 판단된다. 현재 무인기의 동력 시스템은 주로 내연기관과 2차 전지에 의존하고 있는 실정이다. 내연기관은 높은 동력을 지니지만, 효율과 진동 및 소음 문제가 존재하여 저고도 임무 수행에 제약이 있고, 배터리의 경우에는 에너지 밀도가 작아 운용 시간에 제약이 따른다. 반면, 연료전지의 경우에는 소음과 진동이 적을 뿐 아니라, 높은 열효율과 에너지 밀도의 장점으로 인해서 세계적으로 연료전지를 무인기에 적용하여 운용 시간을 증가시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

국외에서는 미국의 AeroVironment 사가 Puma에 연료전지 시스템을 적용하여 Puma의 표준 배터리 운용 시간에 3 배 이상에 달하는 기록으로 장기체공에 성공하였다. 이는 연료전지 시스템이 무인기의 동력원으로 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준 사례이다. 또한, 싱가포르의 Horizon사는 수소화붕소나트륨(NaBH_4)의 가수분해를 이용하는 수소 연료전지 동력시스템을 개발하여, 이스라엘, 한국(KARI) 등의 무인기와 결합해 비행시험을 수행하였다. 국내에서는 KAIST가 독자적으로 연료전지 무인기를 개발하여 2009년에 2 시간 동안의 비행에 성공하였다.

세계적으로 연료전지 무인기에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며 장시간 체공 능력이 입증되었지만, 국내에서는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연료전지를 이용하여 소형 무인기의 장기 체공을 위한 청정에너지 동력 시스템의 개발을 수행하였다. 장기체공을 위해 시스템 요소 기술을 개발하였으며, 요소 기술을 토대로 시스템을 통합하고 성능 평가를 수행함으로써 장기체공을 위한 150 W급 연료전지 동력 시스템을 검증하였다.

2. 요소 기술 개발

소형 무인기의 적용을 위해서 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 NaBH_4 를 사용하는 연료전지 시스템을 구상하였다. 전해질에 따라 연료전지의 종류가 다양하지만, 낮은 작동 온도, 단순한 시스템의 장점을 지닌 PEMFC를 소형 무인기의 동력원으로 선정하였다. PEMFC는 저온에서 작동되기 때문에 전극 촉매로 활성이 우수한 백금을 사용하므로, 피독되기 쉬워 높은 순도의 수소 공급이 필수적이다. 고순도 수소를 공급하기 위한 방식에는 다양한 방법(액화수소, 기체수소, 금속수소화물, 화학적수소화물)이 존재하나, 무인기의 크기(소형), 운용성(빠른 시동특성, 안전성, 용이한 충전)을 고려하여 화학적수소화물 중의 하나인 NaBH_4 를 수소의 공급원으로 선정하였다.

NaBH_4 의 가수분해반응을 통해서 수소를 발생시키기 위해서는 촉매가 필수적이므로, 장시간, 반복적으로 사용이 가능한 촉매의 제작 절차를 확립하였다. 일반적으로 백금,

로듐, 루테튬은 촉매의 활성이 우수하나, 가격이 매우 비싸다. 따라서 가격이 비교적 저렴하면서도 활성이 우수한 코발트를 이용하여 촉매를 제작하였다. 지지체의 내구성을 증가시키기 위해 흐름형 촉매 반응기에 적합한 금속 지지체인 니켈 발포(Ni foam)를 사용하였으며, 촉매와 지지체 사이의 결합력을 향상시키기 위해 결합력이 강하면서 균일한 도금층을 얻을 수 있는 무전해 도금법을 이용하여 Co-P/Ni foam 촉매를 제작하였다.

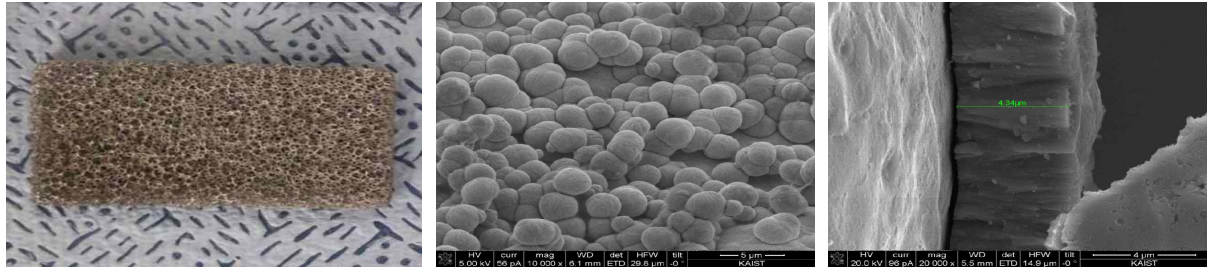


그림 1 Co-P/Ni foam 촉매

먼저 Co-P/Ni foam 촉매의 제작 절차를 확립하였으며, 최적의 조건에서 제작된 촉매의 성능 평가(내구성, 겔보기 활성화 에너지 측정, 가수분해 성능)를 수행하였다. 기존의 Co/Al₂O₃ 촉매와 성능을 비교한 결과, 촉매와 지지체 사이의 결합력과 지지체의 내구성이 우수하였고, 가수분해 성능은 비슷하였다. 겔보기 활성화 에너지는 다른 종류의 코발트 촉매보다 우수하였으며, 루테튬 촉매와 비슷하였다. NaBH₄ 가수분해 반응은 발열반응이므로, 고온에서 반응 특성이 향상되며 향상의 정도는 루테튬과 비슷하다고 할 수 있다.

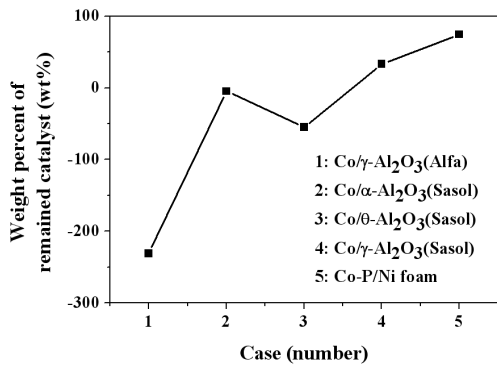


그림 2 내구성 비교¹⁾

표 1 겔보기 활성화 에너지 비교

촉매	겔보기 활성화 에너지(E _a)
Co-P/Ni foam	46.8 kJ/mol
Co-B/Ni foam	33.0 kJ/mol
Co-W-B/Ni foam	29.0 kJ/mol
Co/Al ₂ O ₃	32.6 kJ/mol
Ru/IRA-400	47.0 kJ/mol
Ni _x B	38.0 kJ/mol

3. 연료전지 시스템의 설계

요소 기술 개발을 토대로 연료전지 시스템의 설계를 수행하였다. 시스템 설계에서는

1) (-) 부호는 담지된 촉매 뿐 아니라 지지체까지도 소실된 것을 의미

스택의 운용모드를 선정하였으며, 수소 발생기를 설계하고 장시간 성능 평가를 수행하여 장시간 운용 가능성을 검토하였다. 또한, 스택을 경량화하고 NaBH₄의 농도를 향상시켜 시스템 무게와 연료 무게를 절감함으로써 에너지 밀도를 향상시켰다. 최종적으로 시스템을 통합하여 성능 평가를 수행하였으며, 무인기를 제작하여 연료전지 시스템을 무인기에 탑재하였다.

스택의 운용모드 실험을 수행하여 출력 안정성을 평가하였으며, 실험 결과를 토대로 출력 안정성을 위해서 폐쇄형 운전과 주기적으로 퍼지를 수행하는 방식을 채택하였다. 수소 발생기 촉매의 초기 응답특성 및 내구성 향상을 위해서 이중층 촉매 반응기를 구상하여 6 시간동안 성능 평가를 수행하였다(그림 3). 6 시간 동안 비교적 안정적으로 수소를 발생시켰으며, 초기 응답특성과 전환 효율은 10 초와 96.3%로 우수하였다. 150 W급 수소 발생기의 성능 평가를 통해서 장시간 작동 가능성을 검증하였다.

에너지 밀도를 향상시키기 위해서는 시스템의 경량화가 중요하다. 따라서 스택의 경량화를 수행하고, 연료의 무게 절감을 위해서 NaBH₄ 농도를 증가시켰다. 스택의 성능 저하 없이(표 2), End-plate와 케이스 교체를 통해 스택의 무게를 19.3% 절감하였다. 또한, 연료의 무게 절감을 위해서 NaBH₄ 농도에 따른 수소발생특성을 확인하였다. NaBH₄의 농도가 높을수록 연료의 무게는 감소한다. 하지만 농도가 증가함에 따라 생성물의 석출이 발생하였고, 이러한 석출이 가수분해 반응을 방해하여 전환 효율이 감소하였다. 실험 결과를 바탕으로 전환효율의 감소를 고려하여 NaBH₄ 농도를 15 wt.%에서 18 wt.%로 증가시켰고, 이를 통해서 100 Wh당 17.3%의 무게(연료전지의 열효율을 40%인 경우)를 감소시켰다.

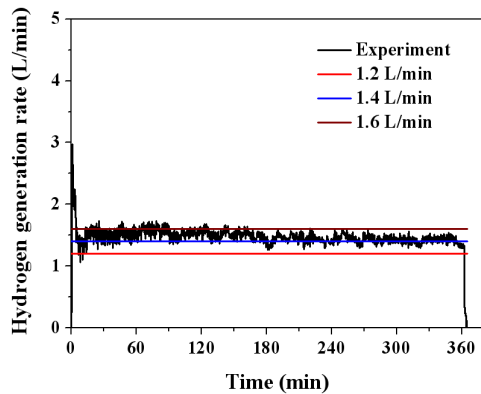


그림 3 수소 발생기의 장시간 성능 평가

최종적으로 150 W급 연료전지 시스템을 설계하여, 요소를 통합하고 성능 평가를 수행하였다. 수소 발생의 시동특성은 10 초 정도로 우수하였으며, 수소 발생률(2.2 L/min)과 스택의 온도(30 °C) 및 전압(28 V)은 모두 안정적이었다. 성능 검증 후, 무인기를 제작하고 통합된 연료전지 시스템을 탑재하여 지상에서 성능 평가를 수행하였다(최대출력: 206 W).

표 2 스택의 경량화에 따른 성능 변화

	교체 전	교체 후
무게 (g)		
End-plate	218	96.4
Case	182	31.6
냉각팬	185.6	185.6
분리판	821.4	821.4
총	1407	1135
경량화: 19.3%, 성능 변화: 1% 미만		

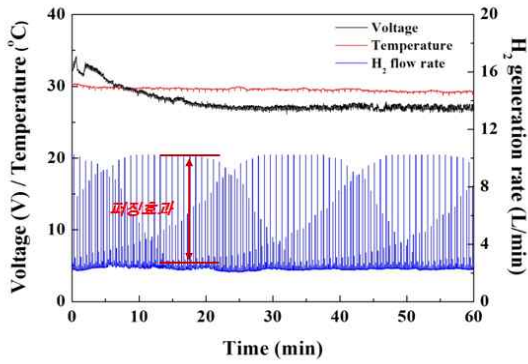


그림 4 연료전지 시스템의 성능 평가

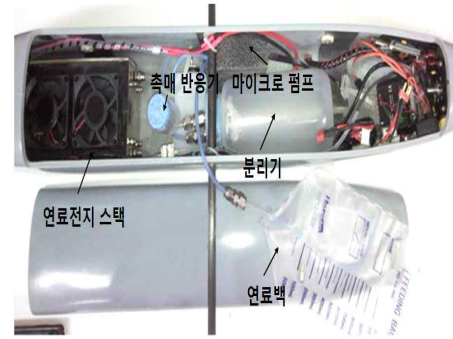


그림 5 무인기에 탑재된 연료전지 시스템

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 소형 무인기의 장기체공을 위한 청정에너지 동력시스템을 개발 및 검증하기 위해 요소 기술을 개발하고, 연료전지 시스템을 설계하여 무인기에 탑재하였다. 기존에 사용되던 Co/Al₂O₃ 촉매의 내구성 문제를 해결하고자, 장시간, 반복적인 사용을 위한 핵심 요소인 Co-P/Ni foam 촉매의 제작 절차를 확립하였다. 또한, 이중층 촉매 반응기를 제안하여 초기 응답특성 및 내구성을 향상시켜 6 시간동안 안정적인 가동이 가능하도록 하였다. 시스템의 에너지 밀도 증가를 위해 시스템의 경량화(스택의 경량화 및 NaBH₄ 농도 증가)를 수행하였고, 이를 통해 시스템의 무게를 27.8% 감소시킴으로써 에너지 밀도를 38.5% 증가시켰다. 최종적으로 150 W급 연료전지 시스템을 제작하고 성능 평가를 실시하여 연료전지 시스템의 안정성 및 가능성(최대출력: 206 W, 연료전지 시스템 에너지밀도: 196 Wh/kg, 리튬-폴리머 전지: 120~180 Wh/kg)을 검증하였다.

본 논문에서 제안하는 청정에너지 동력시스템은 수소의 공급원으로 NaBH₄ 용액을 사용하며 연료전지로 PEMFC를 사용하므로 시스템이 단순하다. 또한, NaBH₄ 용액은 안정할 뿐 아니라 재충전 시 NaBH₄ 용액만 교체하면 되므로 정비가 매우 용이하다. 위험하며 충전이 불편한 기체 수소 방식과는 달리 현장에서 쉽게 사용될 수 있다는 강점을 지니고 있어, 장기체공을 위한 소형 무인기의 동력시스템으로 매우 적합하다.

현재, 국내·외의 다양한 연구 그룹에서 연료전지 무인기를 개발하여 무인기의 운용 시간을 늘리고자 하고 있다. 그러나 아직 국내에서는 많은 연구가 필요하며, 연료전지 시스템의 핵심 기술을 보유하는 것이 시급한 실정이다. 따라서 연료전지 시스템의 핵심 기술을 자체적으로 확보하고자 연료전지 무인기의 동력시스템 연구를 수행하였다. 본 연구의 수행을 통해서 얻어진 결과는 향후 연료전지 무인기의 동력시스템 개발을 위한 기초 자료로 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.