

# 하이브리드 및 연료전지 연계형 해양구조물용 전력체계

박도영\* · † 오진석

\* 한국해양대학교 메카트로닉스공학과 대학원, † 한국해양대학교 기관공학부 교수

## Hybrid & Fuel Cell Connection Power System for Ocean Structure

Do-Young, Park\* · † Jin-Seok, Oh

† Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\* Division of Mechatronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 해양구조물 전력시스템은 독립형 전력체계를 구축하기 어렵다. 그러므로 해상용 전력시스템을 효과적으로 운영하기 위하여 연료전지 및 하이브리드 전력체계를 연동한 전력시스템을 구축하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 연료전지 기반의 해양구조물용 전력체계 설계에 필요한 수소 발생 메카니즘, 사용 전력량 계산과정 등을 기초로 해상용 연료전지 기반의 전력체계를 설계하고, 설계된 전력 시스템을 LabVIEW 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 및 분석하였으며, 이를 기반으로 해양구조물용 전력시스템 설계 방안을 제안하고자 한다.

**핵심용어** : 해양구조물, 해상용 전력 시스템, 하이브리드 전력체계, 고분자 전해질 연료전지, 독립형 전력체계

**Abstract** : Ocean structure's power system is difficult to construct a stand-alone power system. Therefore, to manage effectively power system of ocean structure, it's important to construct power system which is connected fuel-cell with hybrid power system. This paper designs power system of fuel-cell for the sea based on hydrogen generation mechanism, calculation of using electric power, etc. Designed power system is analysed & simulated using LabVIEW program. And, this paper suggests design method of power system for ocean structure based on analysed & simulated results.

**Key words** : Ocean Structure, Power System for the Ocean, Hybrid Power System, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Stand-alone power system

## 1. 서 론

해상에서 운용되는 다양한 구조물은 상용전원을 사용할 수 없는 환경을 가진 것이 많다. 대부분 해상에서 사용하는 전력은 해양에너지 발전시스템을 이용한다. 해상에서 얻는 전력은 육상에서보다 저장에 어려움이 많기 때문에 충전효율이 좋은 다양한 축전지를 개발하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, 축전지보다 저장능력이 우수한 저장장치에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 해상에서 활용할 수 있는 연료전지 기반의 전력체계 개발이 대표적이다. 해상 시설물의 전력요구에 적합하도록 하이브리드 발전과 연료전지 기반의 전력체계를 연계한 시스템에 대하여 기술하고자 한다. 해양에너지를 이용한 발전전력은 기상 영향을 많이 받는다. 그러므로 상호 보완성을 가지고 있는 해양에너지원의 특성을 효과적으로 활용할 수 있도록 하이브리드형 발전시스템과 연료전지를 연동하여 해양시설물용 전력체계를 구축하는 것이 바람직하다. 복합 전력시스템은 태양광, 파력, 풍력을 연동한 하이브리드 발전시스템으로 설계하고, 이러한 하이브리드 발전체계와 연동한 연료전지로 전체 전력시스템을 구축한다.

본 연구에서는 전력시스템 특성을 파악하기 위하여 LabVIEW 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고, 시뮬레이션 결과를 기반으로 수정 및 보완을 거쳐 해양시설물에 적합한 연료전지 기반의 전력시스템을 제안하고자 한다.

## 2. 해양구조물용 전력체계

### 2.1 전력체계 설계

해상에서 운영되는 기존의 전력체계는 태양광 기반으로 운영되기 때문에 안정적인 운영에 많은 문제점을 가지고 있다. 특히 기상에 따른 문제점이 가장 심각하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 하이브리드 복합발전시스템에 대한 연구가 진행 중에 있지만 향후 해양플랜트에 운영될 예정인 다양한 장비를 감안하면 보다 안정적인 전력체계 개발을 추진해야 한다.

해양시설물용 전력체계는 육상의 전력체계와 차이점이 많다. 육상의 태양광 발전시스템은 계절별 태양궤도에 따라 일정한 입사각을 가지고 있지만 가동식 해상구조물에 설치되어

\* 연회원, freedled@nate.com 051)410-4866

† 교신저자 : 종신회원, ojs@hhu.ac.kr 051)410-4283

있는 태양광 발전시스템은 입사각이 기상 에 따라 급격한 변화를 가진다. 그러므로 육상용 태양광 MPPT(Maximum Power Point Tracker) 알고리즘을 적용하는 것은 무리가 있다. 그러므로 해상용 태양광 시스템에 적합한 실시간 추적알고리즘을 적용해야 한다.

운용할 수 있는 파력발전시스템은 다양한 형태가 있는데, 본 연구에서는 진동수주형 파력발전시스템을 대상으로 연구를 수행한다. 진동수주형 파력발전시스템에서 유입손실을 줄일 수 있도록 유입구 형상을 변경하여 파력발전시스템을 구축한다. 이러한 파력 발전시스템은 기존의 시스템에 비하여 효율을 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 전력체계에서는 파력에너지를 불규칙한 특성을 가지고 있으므로 전력을 안정화할 수 있는 컨버터가 필요하다.

풍력발전시스템은 해양구조물이 고정된 경우와 움직이는 경우에 구조적인 차이점이 있다. 고정식인 경우에는 수평축 및 수직축 모두가 고려대상이지만, 움직이는 경우에는 일반적으로 수직축을 고려대상으로 하는 경우가 많다. 풍력발전시스템도 풍력에너지 특성에 따라 출력의 가변성이 높기 때문에 출력의 안정화를 위한 컨버터를 고려해야 한다.

그 밖에 소형 조류발전시스템 등을 연동할 수 있으며, 이러한 시스템은 위에서 언급한 세 가지 발전시스템의 발전 및 충전 기법을 응용하여 처리할 수 있다. Fig. 1은 본 연구대상의 연료전지 전력체계 구성도를 도시한 것이다.

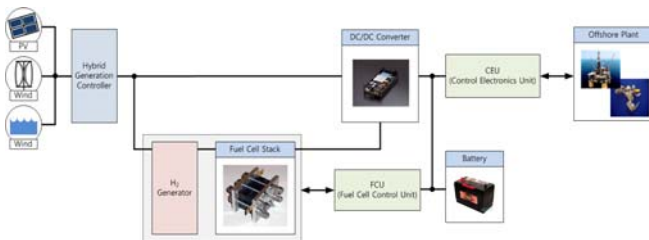


Fig. 1 Schematic diagram of power system with fuel cell in ocean facility

태양광 패널, 파력 에너지 변환기, 풍력 터빈은 부피가 크고, 값이 비싸고, 효율이 낮다. 또한 발전전력을 저장할 수 없는 단점을 가지고 있다. 해양에서 운영할 수 있는 연료전지시스템은 제어성, 경제성 등의 측면에서 다른 해양 에너지시스템에 비하여 월등히 유리하다. 그러므로 연료전지를 이용하여 해양구조물의 전력체계를 구축하면 공간적인 이점과 발전효율을 개선할 수 있다.

2.2 해양구조물 소요전력량 산출

해상에서 운영되는 해양구조물은 대부분 독립형 전력체계를 가지고 있으며, 다양한 방법으로 소요전력을 계산하고 있다. 해상에 설치된 해양구조물의 소모전력 및 여유전력을 산출하기 위하여 고려해야할 사항은 Table 1과 같다.

Table 1 Consideration items for power estimation

항목	내용	비고
해상에 설치된 해양 구조물의 환경적 특성	- 설치 공간의 한계성 - 악천후로 장비의 고장 및 노후화 속도가 빠름 - 규정에 따라야 함으로 효율적인 배치가 어려움	
전원 부족 방지를 위한 예측 계산	- 전력 계통 고장 및 생산전력 감소량 반영 - 추가 설치 장비에 대한 전력량 반영	
현재 장비 소모 전력량 계산	- 운영환경에 따른 전력량 계산 - 장비별 소모 전력량 계산	
부하 산정 과정에 고려해야 할 변수	- 계절에 따른 주야간 부하 변동 전력량 - 온도 및 전압 변동에 따른 전력량	

해양구조물에서 운영되는 장비들은 일정한 주기를 가지고 작동 및 정지를 반복하기 때문에 실제 일일부하는 동작주기를 고려하여 계산한다. 식 (1)은 동작주기를 고려한 부하인 실제 부하(D<sub>HL</sub>)를 나타낸 것이다.

$$D_{HL} = L_t \times W_t \times \alpha \quad (\text{Wh/day}) \quad (1)$$

여기서 L<sub>t</sub>는 부하합계이고, W<sub>t</sub>는 일일 작동시간을 나타낸 것이며, α는 듀티 비(duty ratio)로 일일작동 시간 (T)와 실제 동작시간의 비를 나타낸다. 또한, 여유전력량도 해양구조물 발전시스템 설계에 대단히 중요한 요소이다. 여유전력량(P<sub>m</sub>)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = G_a - C_a \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

여기서 G<sub>a</sub>는 평균 발전량이고, C<sub>a</sub>는 평균 사용전력이다. 해양구조물에서 일정한 전력을 공급하기 위해서는 축전지가 대단히 중요하다. 축전지 및 연료전지는 부조일 수(S<sub>nd</sub>)를 고려하여 설계한다. 축전지의 용량 혹은 연료전지의 출력(B<sub>c</sub>)은 식 (3)으로 계산할 수 있다.

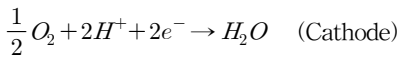
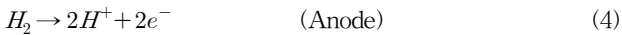
$$B_c = C_d (S_{nd} + 1) / E_s \quad (\text{W}) \quad (3)$$

여기서 C<sub>d</sub>는 일일 전력소모량(W/day), E<sub>s</sub>는 시스템 효율을 나타낸다. 국토해양부의 연구 자료에서는 해양시설물에 운용되는 독립형 전력체계효율은 육상에 비해 열악한 운영환경을 가지기 때문에 60%정도로 규정하고 있는데, 본 연구에서도 이를 바탕으로 시스템 효율을 60%로 본다.

2.3 해상용 연료전지 발전 특성

본 연구에서 사용한 연료전지는 고분자 전해질형(PEMFC : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)이다. 연료전지 기

반의 해양구조물용 하이브리드 전력체계는 연료전지 구동을 위한 팬 구동용 전력시스템, 연료전지시스템, 연료전지 운보조시스템 등으로 구성된다. 연료전지의 원리를 간략히 정리하면 다음과 같다. 연료전지는 에너지 변환시스템으로 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 에너지 변환장치이지 에너지 저장장치가 아니다. 연료전지에서 수소는 연료극(anode)으로 공급되고, 산소는 공기극(cathode)으로 공급된다. 공급된 수소는 전극 촉매상에 수소이온(H<sup>+</sup>)과 전자(e<sup>-</sup>)로 분해되고, 수소이온만 고분자 전해질막을 통과하여 공기극으로 이동한다. 동시에 전자는 외부의 전선을 통해 이동한다. 이동한 전자는 공기극에서 산소와 만나서 물을 생성하는 반응을 한다. 이러한 과정을 수식으로 나타내면 식 (4)와 같다.



연료전지의 연료인 수소는 순수 수소를 이용하거나, 도시가스, 메탄올, 에탄올 같은 탄화수소를 이용하여 개질이라는 과정을 통해 생산된 수소를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 해양구조물 환경에서는 이러한 수소를 이용하는데 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 해상에서 마그네슘 합금을 이용한 수소 발생 시스템에 대하여 연구하였다. 다음 Fig. 2는 해수를 촉매로 하는 수소 발생 시스템의 개념도이다. 해양에너지를 이용하여 발전된 전력을 복합 발전제어기를 통해서 마그네슘합금 극에 보내준다. 마그네슘합금은 해수를 촉매로 화학식 (5)와 같이 반응을 하게 되며, 이로 인해 수소를 얻을 수 있다.

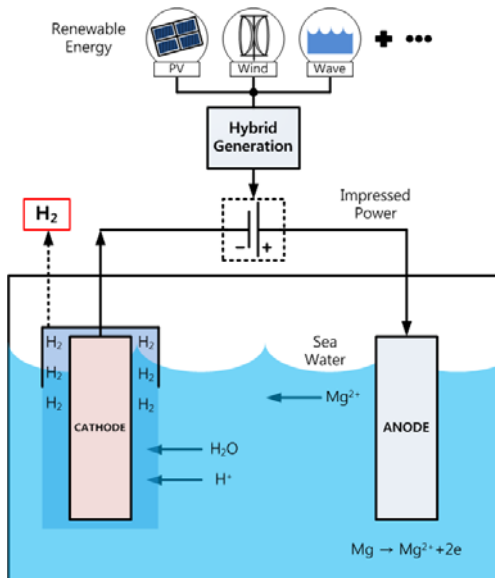
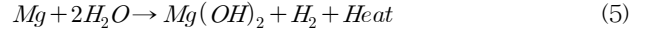


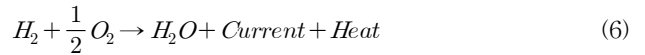
Fig. 2 Principle of hydrogen generator system

또한, 수소 발생 시스템은 부하 측의 전력요구량이 낮거나 없을 때는 수소가 공급이 줄어들고 수소 발생기에서는 수소

압력이 증가하게 되어, 마그네슘의 수면 접촉 면적이 줄어든다. 접촉 면적의 감소는 반응면적을 줄여서 수소 발생량을 줄이는 효과가 있다. 이처럼 수소 발생량은 연료전지 요구에 따라 제어되며, 전력요구량에 맞게 합금의 수면접촉면적은 안정적인 레벨을 유지한다. 수소생산량의 비는 합금성분의 함수이다. 전체 합금 반응면적은 요구하는 최대 수소 생성량 및 전력요구량과 관계가 있다.



여기서 해수가 촉매로 작용하게 된다. 발생한 수소는 일정한 압력을 가지고 연료전지로 흘러들어가고, 연료전지의 멤브레인을 통과하면서 분리된 수소양자에 의해 전류가 발생한다. 식 (4)에서의 순수한 물을 발생하는 과정을 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.



해양구조물에 필요한 전력체계는 설치되는 장치, 통신시스템, 센서 등의 필요전력을 만족하도록 설계해야 한다. 그러므로 해양구조물에 적용되는 독립형 전력체계에 맞는 요구전력량을 계산하여 반영하는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 거쳐 해양구조물에 적합한 연료전지 기반의 전력체계를 구성해야 한다. 연료전지 반응에서 H<sub>2</sub> 1mol 당 전달되는 전하의 총량(Q<sub>t</sub>)은 식 (7)과 같다.

$$Q_t = n \cdot N_{avg} \cdot q \quad (7)$$

여기서 n은 mol당 전자수(e<sub>v</sub>/mol), N<sub>avg</sub>는 Avogadro 수 (6.022×10<sup>23</sup> 분자/mol), q는 전자 하나의 전하(1.602×10<sup>-19</sup> coulomb/전자)이다. 연료전지 성능은 온도를 높여 개선할 수 있지만, 온도를 높이면 전위손실이 동반된다. 연료전지의 이론 전위(E)는 식 (8)과 같다.

$$E = - \left( \frac{\Delta H}{n F} - \frac{T_{tem} \Delta S}{n F} \right) \quad (8)$$

여기서 ΔS는 에너지 변환과정 생성물과 반응물의 엔트로피 차이이고, ΔH는 생성물과 반응물의 생성 엔탈피차, F는 패러데이 상수(96,485 coulomb/mol 전자)이다. 일반적으로 PEMFC는 10 kW 미만의 소전력용으로 많이 사용하며, 축전지 보다 에너지 밀도가 높다.

### 3. 전력시스템 구성

연료전지 전력시스템은 부하요건(전압, 전류, 과도현상 등)에 맞도록 조정하는 기능을 가지고 있어야 한다. 연료전지는 직류를 생산하며, 전압은 전류에 따라 변한다. 일반적으로 연료전지 분극 곡선에 따라 변환기가 Fig. 3과 같이 정해진다.

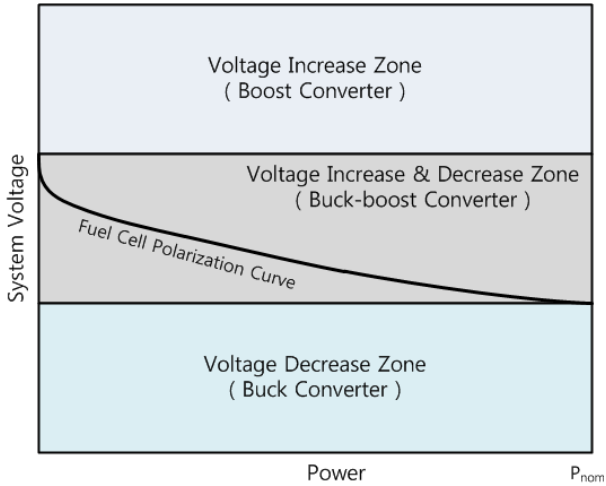


Fig. 3 Definition of fuel cell converter

연료전지의 출력은 벡(buck), 부스터(boost), 벡-부스트형 컨버터로 조절할 수 있다. 해양구조물의 경우 대부분 전압을 승압해야 하는 경우가 많으므로 Fig. 4와 같이 부스트형 전력 체계로 구축한다.

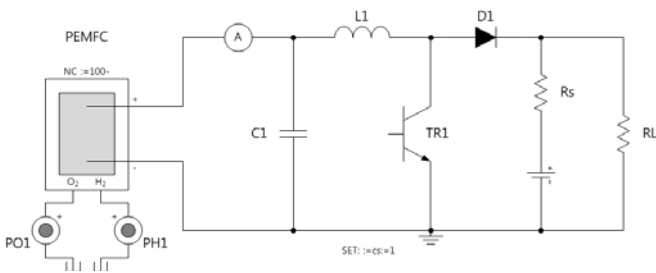


Fig. 4 Schematic diagram of boost converter

부스터 컨버터의 출력은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있지만, 실제의 경우 스위칭 에너지 손실 등으로 다소 감소된다.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (9)$$

여기서  $V_{in}$ 은 입력 전압,  $V_{out}$ 은 출력 전압,  $D$ 는 듀티비 ( $T_{on}/T$ ) 이다.

연료전지 전기시스템 구조는 Fig. 5와 같이 구성하며, 여기서 보조 장치로는 송풍기, 펌프, 밸브, 계장 등이 있다.

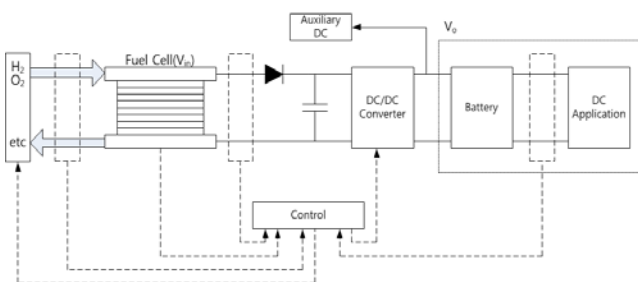
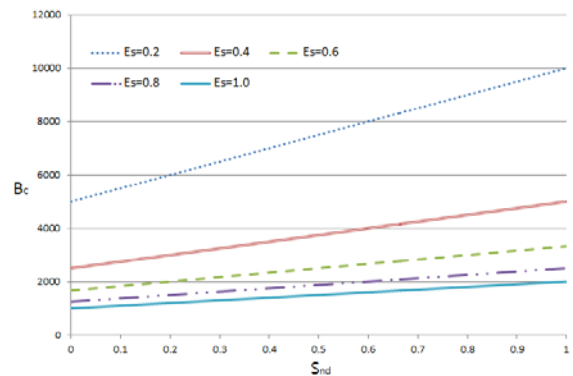


Fig. 5 DC power system for fuel cell

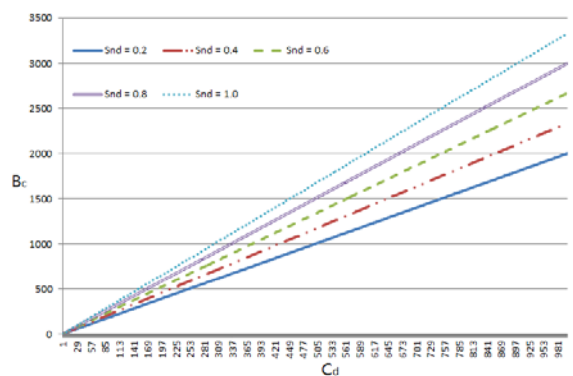
#### 4. 시뮬레이션 및 분석

해양구조물용 전력시스템은 독립형 전력체계로 요구전력량은 기상의 영향을 많이 받는다. 그러므로 해양구조물용 연료전지 기반의 전력체계는 연료전지 용량, 안전한 출력을 얻기 위한 컨버터 동작특성 등에 대한 시뮬레이션 및 분석을 통하여 설계를 해야 한다. 이러한 시뮬레이션 결과 분석을 통하여 설계를 해야 하고 해양구조물 특성에 맞는 해양구조물용 전력 체계를 구축한다.

먼저 연료전지의 전위는 식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이 생성물과 반응물의 생성열 및 엔트로피 차에 영향을 받는다. 그러므로 안정적인 전위를 유지하기 위해서는 온도를 제어할 필요가 있다. 또한, 가진 연료전지를 해상구조물에 전원으로 활용할 때는 요구전력량에 적합하게 연료전지용량을 결정해야 하는데, 이는 식 (3)을 이용하여 연료전지용량을 결정한다. 용량결정 과정에서 부조일수, 일일 전력소모량, 효율 등을 변수로 두고 결정한다. Fig. 6의 (a)는 일일 전력소모량을 일정하게 두고 부조일수와 효율 변화에 따른 연료전지 용량변화를 도시한 것이고, Fig. 6의 (b)는 부조일수를 일정하게 두고 전력소모량 변화에 따른 연료전지 용량변화를 도시한 것이다. Fig. 6의 (a)의 경우 계절에 따른 해양구조물의 발전량 및 요구전력량 변화에 직접적인 영향을 미치는 상태를 파악하기 위한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부조일수는 연료전



(a) Fixed daily power consumption



(b) Fixed irregularity days

Fig. 6 Volumetric variation of fuel cell

지의 블로워 등의 보조전력에 필요한 전력증가와 해양구조물의 소모전력 증가로 인한 연료전지 용량증가를 요구한다. 그리고 Fig. 6의 (b)에서는 해양구조물의 요구전력량 변화가 낮 시간과 야간에 따라 변화하는 특성을 고려해야한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 부스트 컨버터의 스위칭이 연료전지의 전원(Vi)에 영향을 미치는 상태를 파악하기 위해 도기한 것이다. 부스트 컨버터는 입력전압이 출력전압보다 낮은 경우에도 출력을 얻기 위해 사용하는 컨버터이다. Fig. 7은 식 (9)로 알 수 있는 바와 같이 듀티비는 출력에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 연료전지를 전원으로 이용할 때 연동되는 컨버터 손실을 줄이기 위하여 반드시 고려해야 한다.

Fig. 8은 전위특성 식 (8)을 도기한 그림이다. 온도 ( $T_{tem}$  : 298.15K)가 일정하게 유지된다는 가정 하에  $\Delta S$ (에너지 변환 과정 생성물과 반응물의 엔트로피 차 :  $-0.16328 \text{ kJmol}^{-1}$ ) 및  $\Delta H$ (생성물과 반응물의 생성열차 :  $-286.02 \text{ kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )의 변화에 따른 전위변화를 도기한 것이다.

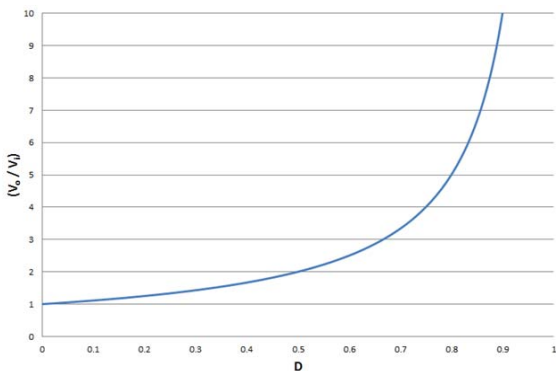


Fig. 7 Characteristic curve of boost converter

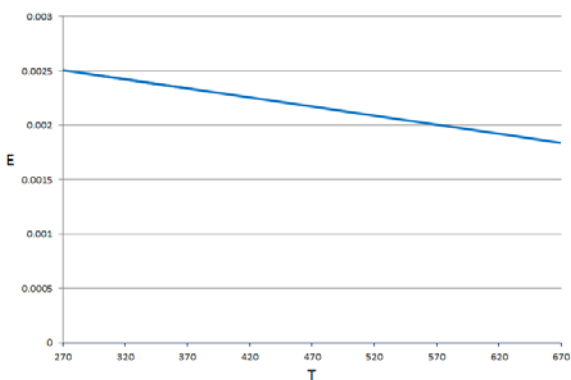


Fig. 8 Variation of energy according to the temperature

Fig. 8에서 온도가 증가하면  $\Delta H$  및  $\Delta S$ 는 모두 감소하고, 일반적으로 100℃ 미만에서는  $\Delta H$  및  $\Delta S$  오차는 매우 작다.

### 3. 결론

하이브리드 발전 시스템과 연료전지 기반의 전력 체계를 연계한 해양 구조물 전력 시스템을 연구하였다. 해양 환경에서 적용 가능하도록 마그네슘 합금을 이용하여 해수에서 수소를 만들어 연료전지 연료극으로 공급하도록 하였다. 또한 해양구조물의 소요전력 계산을 위한 방법을 제시하였으며, 이를 바탕으로 연료전지의 적정 용량을 계산할 수 있었다. 이러한 전력시스템의 특성을 파악하기 위해 LabVIEW 프로그램을 통해서 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 적절한 연료전지의 용량과 부스터 컨버터의 출력을 확인할 수 있었다. 안정된 전력체계를 위하여 연료전지 시스템에 부스터 컨버터를 연계하여 부하요건에 맞게 출력을 조절할 수 있도록 구성하였다. 또한 온도변화에 따른 엔트로피 차 및 생성열 차는 온도가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 그러므로 운전온도가 가능한 높은 것이 바람직하지만 상용화를 위해 100℃ 미만에서 사용할 수 있는 해양플랜트 구조물용 고효율 연료전지 시스템을 전력체계에 활용할 수 있는 방안도 함께 연구되어야 할 것으로 생각한다.

### 후 기

본 연구는 해양시설물용 hybrid 전력생산시스템 기술개발 사업과 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김홍건, 김유신, 양성모, 나석찬(2005), "고분자전해질형 연료전지의 성능해석 및 효율에 관한 연구", 한국생산제조시스템학회 논문집, 제 14권 제 4호, pp.75-80.
- [2] 홍원표, 조재훈(2011), "고분자전해질 연료전지(PEMFC)와 PEMFC/SCB의 동적 Matlab/Simulink 모델링 및 독립운전특성에 관한 연구", 한국조명전기설비학회 논문지, 제 25권 제2호, pp.53-60.
- [3] Jung, J.H.(2010), "Dynamic Model of PEM Fuel Cell Using Real-time Simulation Techniques", Journal of Power Electronics, 제 10권 제 6호, pp.234-238.
- [4] Turner, M.W, Cleland, J.G., Baker, J(2009), "Salt Water Activated Power System (SWAPS) for Ocean Buoys and Related Platforms", Falmouth Scientific Inc. 21 January 2009.

원고접수일 : 2011년 7월 11일  
 심사완료일 : 2011년 9월 28일  
 원고채택일 : 2011년 9월 30일