Journal of the KIMST, Vol. 17, No. 5, pp. 694-702, 2014
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2014.17.5.694

Research Paper 에너지 부문

수중함용 2차전지-연료전지 추진체계의 성능 예측을 위한 M&S 연구

지현진[1),2)] · 조성백[2)] · 배중면[*,1)]

[1)] 한국과학기술원 기계공학과
[2)] 국방과학연구소 제4기술연구본부

Modeling and Simulation of Secondary Battery-Fuel Cell Propulsion System for Underwater Vessel to Estimate the Operation Time

Hyunjin Ji[1),2)] · Sungbaek Cho[2)] · Joongmyeon Bae[*,1)]

[1)] *Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea*
[2)] *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 3 March 2014 / Revised 7 July 2014 / Accepted 15 August 2014)

ABSTRACT

One of the most important devices in an underwater vessel is a propulsion system. It should be a quiet and efficient system for stealthy operations in the large mission area. Hence lead-acid battery system has been used to supply the energy to electric motor. Recent technological developments and improvements, such as polymer electrolyte membrane(PEM) fuel cell and lithium polymer battery and have created the potential to improve overall power and propulsion performance. An underwater vessel always starts their mission with a limited energy and is not easy to refuel. Therefore design of energy elements, such as fuel cell and battery, and their load distribution are important to increase the maximum operating time of underwater vessel. In this paper, the lead-acid battery/PEM fuel cell and lithium polymer battery/PEM fuel cell were suggested as propulsion system and their performances were analyzed by modeling and simulation using Matlab/Simulink. Each model concentrated on representing the characteristics of energy element depending on demand current. As a result the effect of load distribution between battery and fuel cell was evaluated and the operation time of each propulsion system was able to be estimated exactly.

Key Words : Lead-acid Battery(납축전지), Lithium Polymer Battery(리튬 폴리머 전지), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(고분자 전해질형 연료전지), Operation Time (운용 시간)

1. 서 론

기존의 재래식 수중함 추진방식은 디젤 전기추진방

* Corresponding author, E-mail: jmbae@kaist.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

식으로 잠항시에는 납축전지(lead acid battery)와 연결된 추진모터(propulsion motor)를 구동시켜 수중함을 운전하고, 수중에서 소비된 납축전지의 전기에너지는 수면근처에서 디젤엔진과 연결된 발전기를 이용하여 재충전된다. 수중함이 디젤엔진을 구동시키기 위해서는 스노클(snorkel)을 수면 위로 노출시켜 외부 공기를 함내로 흡입해야 한다. 이런 과정에서 수중함은 적으로부터의 적발될 위험이 증가하게 되고 작전수행능력이 크게 감소된다. 위와 같은 문제점을 보완하고 수중함의 잠항능력을 향상시키기 위해 1980년경부터 각국에서는 AIP(Air Independent Propulsion)시스템에 대한 연구개발이 활발히 이루어졌으며 현재에는 다양한 형태의 AIP 시스템이 적용된 재래식 수중함들이 실전 배치되어 작전을 수행하고 있다.

AIP 종류 중 하나인 연료전지 추진시스템은 타 시스템과 비교하여 효율 및 소음 측면에서 월등히 우수하여 독일, 그리스, 한국 등의 국가에서 1200～1800 t급 수중함용 AIP시스템으로 채택되어 사용되고 있다[1].

연료전지 추진 수중함의 동력원은 크게 연료전지, 2차전지, 디젤엔진으로 구성되어 있다. 수중함은 공기가 없는 수중환경에서 작전을 수행해야 하므로 연료전지에서 생성된 전기에너지와 2차전지에 저장된 전기에너지의 이용방법에 따라 수중함 잠항 지속 시간이 결정된다. 따라서 수중함의 함장이 함내에 저장된 에너지 사용 방법을 결정하기 위해서는 연료전지와 2차전지에 잔존하는 전기에너지량을 정확하게 예측해야 할 필요가 있다. 이와 같은 이유로 P. C. Ghosh[2] 등은 시스템 레벨 해석을 통해 수중함에서의 연료전지 적용의 효과를 분석하였다. John Buckingham[3] 등도 수중함의 추진 시스템에 대한 시스템 레벨 분석을 통해 에너지 요소에 대한 전력 및 에너지 분배에 대한 효과를 분석하였다. Q. Caia[4]은 UUV(Unmaned Underwater Vehicle) 시스템에 있어서 에너지 요소에 대한 규격 및 크기에 대한 연구를 수행하였다. 위 논문들은 수중함과 같은 제한된 공간과 무게 조건에서 최대 잠항 능력을 보장할 수 있는 에너지 요소에 대한 설계 및 관리에 대해 연구를 수행하였다는 공통점이 있으나, 2차전지나 연료전지의 모델링 없이 단순히 에너지 레벨에서의 계산을 바탕으로 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 기존의 연구보다 정확한 잠항 시간 예측이 가능하도록 수중함의 에너지원인 2차전지와 연료전지에 대한 M&S(Modeling & Simulation)를 바탕으로 추진체계의 운용 조건에 따른 운전시간 및 잔존 에너지량을 예측하고자 하였다. 특히 Table 1과 같이 2차전지는 종류에 따라 전기화학적 특성이 다르므로, 이에 따른 운용효과를 분석하기 위하여 납축전지-연료전지와 리튬폴리머전지-연료전지의 전원 시스템을 구성하고 수중함의 전체 소모전력 중 연료전지가 담당하는 전력량에 따른 잠항시간을 계산하였다. 또한 수중함의 납축전지를 리튬 폴리머 전지로 대체하였을 경우 AIP 추진체계의 성능 향상 효과를 정량적으로 분석하였다.

Table 1. Comparison of lithium polymer and lead-acid battery

	Lithium polymer	Lead-acid
Wh/kg	130～180	30～40
Wh/ℓ	300～400	60～75
W/kg	7100	180
Cycle	>1000	500～800
Eff.(%)	99.8	50～92

2. 에너지 요소 모델

2차전지는 사용하는 전극/전해질 종류에 따라 전기화학적 충방전 특성이 상이하다. 따라서 2차전지의 충방전 특성을 대표할 수 있는 전기화학모델을 선정하여 사용해야 한다. 본 연구에서는 문헌분석을 통해 납축전지와 리튬폴리머전지에 적합한 모델을 선정하였다[5-7].

2.1 납축전지(LAB : Lead-Acid Battery)

Table 2에서와 같이 납축전지의 최대전지용량 $q_{max}(i)$는 방전전류 I값에 따라 크게 달라지는 특성을 가진다. Table 2의 레퍼런스 데이터를 바탕으로 방전전류 I와 최대전지용량은 식 (1)과 같이 지수함수로 표현될 수 있다. 이때 A, B, C는 지수함수의 상수이다.

$$q_{\max}(I) = C + A \times \exp(-I/B); \quad A, B, C = const. \quad (1)$$

납축전지의 모델은 전지의 충전상태(SOC : State Of Charge)와 인가전류에 따른 전압 변화를 예측하기 위하여 Fig. 1과 같이 OCV-R 모델을 사용하였다. 이때 납축전지의 개회로전압(OCV : Open Circuit Voltage) E

Table 2. Lead acid battery(LAB) maximum capacity and normalized capacity

Current (A)	Ref. Data (Ah)	$q_{max}(i)$ (Ah)	Discharge 1 h		Discharge 3 hrs		Discharge 5 hrs		Discharge 10 hrs	
			q_{out}	nor. q_{out}	q_{out}	nor. q_{out}	q_{out}	nor. q_{out}	q_{out}	nor. q_{out}
126	12600	12527.6	126	129.8	378	389.3	630	648.8	1260	1297.6
244	12200	12199.1	244	258.0	732	774.1	1220	1290.2	2440	2580.4
565	11300	11398.8	565	639.5	1695	1918.4	2825	3197.3	5650	6394.6
1040	10400	10429.6	1040	1286.4	3120	3859.3	5200	6432.2	10400	12864.3
1850	9250	9230.7	1850	2585.6	5550	7756.8	9250	12928.0	-	-
2800	7163	8328.1	2800	4337.5	8400	13012.4	-	-	-	-

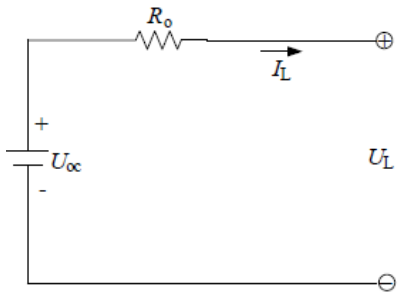

Fig. 1. Lead-acid model(OCV-R)

는 납축전지의 표준화 방전용량(normalized capacity)에 따른 함수로 표현될 수 있다. 표준화 방전용량 X는 식 (2)과 같이 표현될 수 있다.

$$X = \frac{q_{\max,0}}{q_{\max}(I)} \times q_{out} \tag{2}$$

$q_{\max}(I)$는 방전전류가 I일 때 최대 전지방전용량, q_{out}은 실제 전지방전용량, $q_{\max,0}$는 납축전지가 가질 수 있는 최대 전지방전용량으로 I = 0 일 때의 최대 전지용량을 의미한다. 이때 q_{out}은 정의에 따라 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$q_{out} = \int I dt \tag{3}$$

식 (1) ~ 식 (3)을 바탕으로 방전전류에 따른 최대 전지방전용량 및 표준화 방전용량을 계산한 결과는 Table 2과 같다. 예를 들어 방전전류가 1850 A로 1시간 방전할 경우, 실제 방전용량은 1850 Ah이나 표준화된 방전용량은 2585.6 Ah이다. 또한 1850 A로 5시간 방전할 경우 실제 방전용량은 9250 Ah이나 표준화된 방전용량은 12928 Ah로서 납축전지의 최대 전지방전용량인 12910 Ah를 초과하였으므로 납축전지는 더 이상 방전할 수 없다는 것을 의미한다. 이와 같이 표준화 방전용량의 개념을 사용하여 납축전지의 OCV를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$U_\infty = U_0 + AX + CX/(D - X) \tag{4}$$

이때 U_0는 100% 충전된 납축전지의 개회로전압, A는 충전상태에 따른 내부전압의 초기선형변화에 대한 상수, C와 D는 방전 말기 시 전지전압의 변화에 대한 상수를 의미한다.

납축전지의 SOC는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$SOC = \frac{q_{\max,0} - q_{out}}{q_{\max,0}} \tag{5}$$

따라서 납축전지의 터미널 전압 E는 식 (6)와 같이 개회로 전압 E, 방전전류 I, 납축전지 내부저항 R_0의 함수로 표현된다.

$$V = U_\infty - I \times R_0 \tag{6}$$

2.2 리튬폴리머전지 모델(LPB : Lithium Polymer Battery)

리튬폴리머전지는 납축전지와는 달리 OCV-R-RC 모델

(Fig. 2)을 선택하였고, 펄스 방전 및 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 측정을 통해 모델 파라미터를 획득하였다.

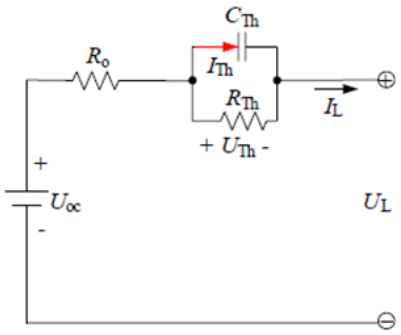

Fig. 2. Lithium polymer battery model(OCV-R-RC)

실험을 위하여 현재 안정적으로 수급이 가능한 20 Ah급 대용량 리튬폴리머전지를 선택하였다. 리튬폴리머전지는 국내 에너테크 인터내셔널사에서 생산한 제품으로서 자세한 규격은 Table 3과 같다. 일반적으로 수중함에 사용하는 리튬폴리머전지는 안전성과 운용온도를 고려하여 단위전지기준으로 최대방전 전류가 1 C가 넘지 않도록 설계되므로 방전 중 온도 상승폭이 적다. 또한 리튬폴리머전지가 설치되는 함내의 온도는 공조시스템을 통해 일정하게 유지되므로 리튬폴리머 전지 모델에 사용되는 파라미터는 단순히 SOC의 함수로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 리튬폴리머전지 실험 장치를 통해 U_{oc}, R_0, R_{th}, C_{th} 파라미터 값을 획득하였다. 단위전지 방전실험은 각 파라미터를 가장 효과적으로 획득할 수 있는 방법을 선택하였다. 이를 위하여 단위전지에 펄스(pulse) 전류를 인가하되 30 사이클을 1세트로 정하고, 세트 간에는 무부하 유지시간이 존재하도록 실험을 진행하였다. 즉 단위전지를 완전 충전 시킨 후 전압과 EIS를 측정하였고, 이후 20 A, 20 sec와 0 A, 40 sec를 주기로 하는 전류 펄스를 30 사이클 방전하였다(Fig. 4). 단위전지는 30 사이클의 펄스를 통해 400 As × 30 = 3.33 Ah의 용량이 감소하게 된다. 펄스 방전을 마친 후에는 30분 이상 무부하 상태를 유지한 뒤 다시 전압과 EIS를 측정하였다. 상기의 실험은 단위전지의 전압이 cut-off 전압인 3.0 V 이하가 될 때까지 지속 수행하였다. 세트 간 무부하 상태에서 측정한 전압을 통해서는 단위전지 SOC에 따른 U_{oc}를 측정할 수 있었고, EIS 측정을 통해서는 단위전지 SOC에 따른 R_0를 측정할 수 있었다.

Table 3. Specification of LPB(20 Ah)

Nominal Capacity		> 20 Ah
Energy Density	Volume	312 Wh/L
	Mass	164 Wh/Kg
Operation Voltage Range		3 ~ 4.2 V
Standard	Charge	0.5 C (10 A)
	Discharge	0.5 C (10 A)
Max. charge current		1.0 C (20 A)
Max. Discharge Current(continuous)		3.0 C (60 A)
Operation Temperature	Charge	0 ~ 40 ℃
	Discharge	-20 ~ 60 ℃
Mass		Max. 480 g

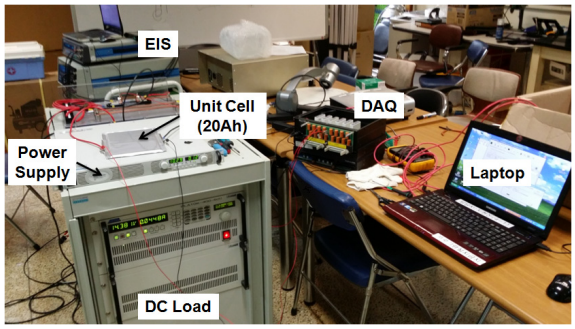

Fig. 3. Experimental set-up for LPB

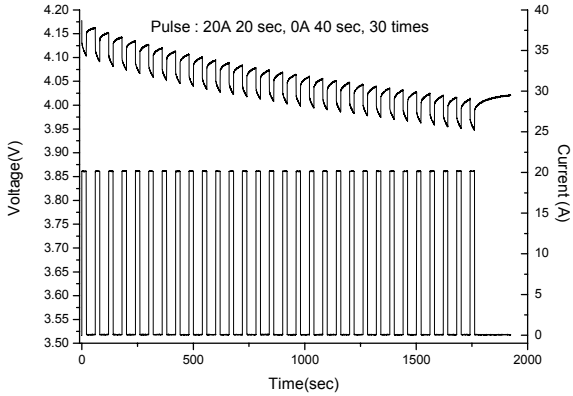

Fig. 4. Voltage response for pulse current

리튬폴리머전지 모델의 나머지 파라미터인 R_{th}, C_{th}는 펄스 전류 방전 결과 분석을 통해 획득할 수 있었다. Fig. 5는 SOC 100 %인 구간에서 펄스 전류 방전의 실험 결과와 본 연구에서 제시한 전지 모델 및 파라미터를 통해 시뮬레이션한 결과를 비교한 그래프이다. 실험을 통해 획득한 모델 파라미터는 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 타당성 및 신뢰성을 검증할 수 있었다. 본 연구에서는 전압의 동적 특성 분석을 통해 SOC 100 %부터 SOC 0 %까지 7 포인트에서 대한 R_{th}, C_{th}의 모델 파라미터를 획득할 수 있었다.

일반적인 수중함의 운전 특성을 고려해 볼 때 리튬폴리머전지의 동적 특성뿐만 아니라 정전류 방전에

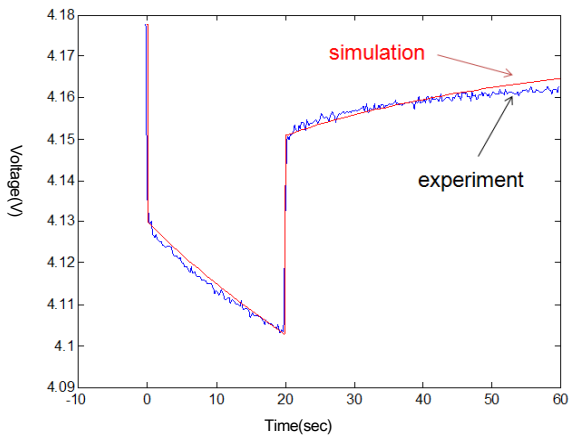

Fig. 5. Comparison of experimental and simulation results for current pulse

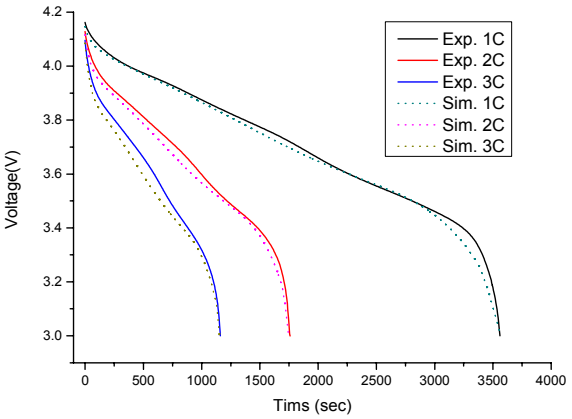

Fig. 6. Constant current(C-rate : 1 C, 2 C, 3 C) discharge characteristic curve for LPB

따른 전압 및 용량 특성도 중요하다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델과 실험에서 획득한 파라미터를 바탕으로 단위전지의 정전류 방전 특성을 실험값과 비교해 보았다. Fig. 6은 단위전지를 1 C, 2 C, 3 C로 정전류 방전하였을 때의 리튬폴리머전지 전압 특성을 나타낸 그래프로 실험 및 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그래프에 나타난 바와 같이 납축전지의 동적 전압 특성은 전류에 관계없이 방전되는 시간 동안 실험과 시뮬레이션이 유사한 결과를 보여주었다.

2.3 연료전지 모델

연료전지는 출력특성, 작동온도, 효율, 운전환경 등을 고려하여 고분자 전해질형 타입을 선택하였다. 특히 수중함용 고분자 전해질형 연료전지의 경우에는 차량용 연료전지가 공기 중의 산소를 사용하는 것과는 달리 함내에 탑재된 액화산소를 사용하므로 추가적인 가압장치 없이 반응물인 산소를 가압하여 연료전지를 운전할 수 있다. 이를 통해 공기압축기와 같이 소모전력이 많은 주변기기의 사용을 배제할 수 있어 상대적으로 높은 시스템 출력 및 효율을 얻을 수 있다.

고분자 전해질형 연료전지의 단위전지 전압은 식 (7)와 같이 운전 조건에 따라 개방회로 전압(E)에 대해 활성화 분극(activation loss, Vact), 내부저항 분극(ohmic loss, Vohm), 농도차 분극(concentration loss, Vconc)의 3가지 전압강하에 차로 표현 된다.

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \tag{7}$$

식 (7)은 경험식을 바탕으로 식 (8)과 같이 단순화하여 표현될 수 있다. 이때 $E_{thermoz}$은 네른스트(Nernst) 전압, a_A, b_A, a_C, b_C는 음극과 양극의 활성화 분극 상수, ASR_{ohmic}은 내부저항, c는 농도차 분극 상수, I_L은 제한전류, I는 전류를 의미한다.

$$V = E_{thermo} - (a_A + b_A \ln I) - (a_C + b_C \ln I) - (I \times ASR_{ohmic}) - (c \ln \frac{I_L}{I_L - I}) \tag{8}$$

Fig. 7은 전류밀도에 따른 연료전지 전압특성에 대해 실험과 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다. 수중함이 사용하는 전류밀도 영역에서 대부분 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

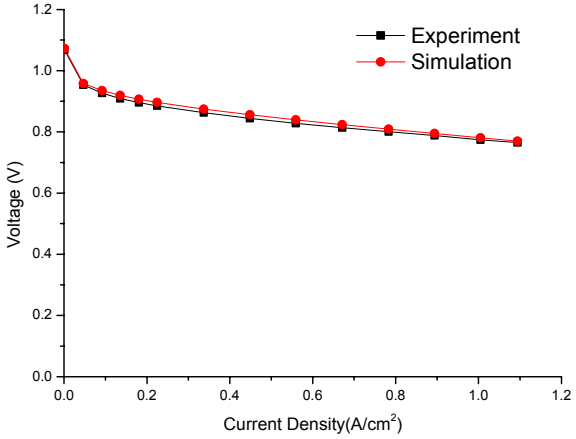

Fig. 7. I-V characteristic curve of fuel cell

3. 전원체계 구성 및 시뮬레이션

일반적인 수중함의 AIP 시스템은 연료전지를 포함하여 2차전지 및 디젤엔진으로 구성되어 있다(Fig. 8). 디젤엔진은 수면 근처에서의 스노클 항해를 제외하고는 수중에서 사용되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 수중함의 잠항 성능을 결정하는 연료전지와 2차전지를 해석 영역으로 생각하였다. 수중함용 전원체계는 크게 납축전지-연료전지 구성과 리튬폴리머전지-연료전지 구성으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 2차전지인 납축전지와 리튬폴리머전지의 직렬연결수는 수중함의 추진모터의 사용전압 범위을 고려하여 산정하였다. 또한 납축전지와 리튬폴리머전지의 병렬수는 동일한 입력부하조건하에서 연료전지의 출력이 300 kW일 때 24시간 동안 전력을 공급할 수 있는 에너지량을 고려하여 산정하였다.

본 연구에서는 문헌[2]에서 확보한 데이터를 바탕으로 Fig. 9와 같이 시간에 따른 수중함의 요구전력을 가정하였다. 이때 요구 전력은 잠항중인 수중함의 초계항해 및 어뢰회피 등을 위한 고속항해를 모사하여 저전력 영역과 고전력 영역으로 나눠 구성하였으며, 함내에서 사용되는 일반부하(hotel load)도 포함시켰다. 2차전지 및 연료전지는 설계자나 운용자의 의도에 따라 전력변환장치 등을 활용해 수중함의 요구전력을 분담하여 공급할 수 있다고 가정하였으며, 전력변환장치의 효율은 100 %로 가정하였다.

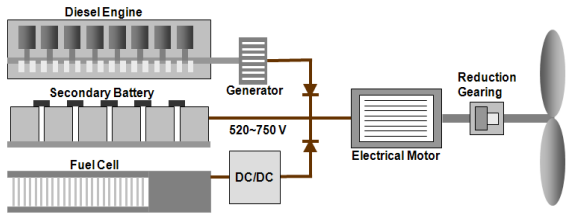

Fig. 8. System layout

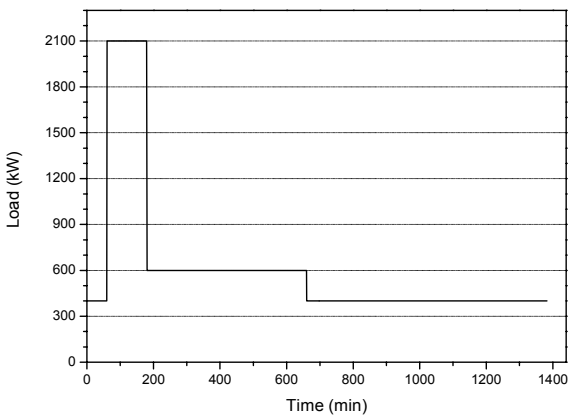

Fig. 9. Total load profile of underwater vessel

수중함의 추진을 위한 에너지원의 선택은 운용자에 의해 결정되고, 이는 수중함의 잠항시간을 결정하는 중요한 변수가 된다. 2차전지는 연료전지에 비해 고율방전 특성이 좋고 시동시간이 짧으며 운용 중에도 디젤엔진을 통해 재충전이 가능하다는 장점이 있다. 이에 반해 연료전지는 함내에 저장된 다량의 수소를 사용하여 고효율로 전력을 생산하므로 2차전지 대비 에너지밀도가 높다는 장점이 있으나, 상대적으로 출력밀도가 낮고 기지로 귀환하지 않는 이상 수소 재공급이 힘들다는 단점이 있다.

운용자는 상황에 따른 연료전지와 2차전지의 전력분담 비율을 결정해야 하고, 이에 따른 잠항 시간의 예측이 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 2차전지 및 연료전지 모델을 구성하고, 수중함의 요구 전력 중 연료전지가 담당하는 전력량의 변화에 따라 납축전지-연료전지 시스템과 리튬폴리머전지-연료전지 시스템의 사용시간의 변화를 계산하였다.

4. 결과 및 토의

2차전지와 연료전지로 구성된 전원체계에서 연료전지가 Fig. 9에서 가정한 전체 부하 중 100 kW, 200 kW, 300 kW를 담당하였을 경우, 2차전지와 연료전지의 전압, 전류 및 에너지 분배량, 작동 시간 등을 시뮬레이션 하였다. Fig. 10은 축전지-연료전지로 구성된 수중함의 전원체계에 있어 부하전력에 따른 납축전지의 전압 및 전류의 변화를 계산한 결과이다. 연료전지는 부하전력에 관계없이 전력을 일정하게 생산하지만 납축전지는 부하전력 중 연료전지의 생산분을 제외한 나머지 전력은 모두 담당해야 하므로 시간에 따라 전류 및 전압이 변화되는 것을 확인할 수 있다. 또한 연료전지가 담당하는 부하전력이 감소할수록 납축전지가 담당해야하는 전력이 증가하므로 납축전지의 운용시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

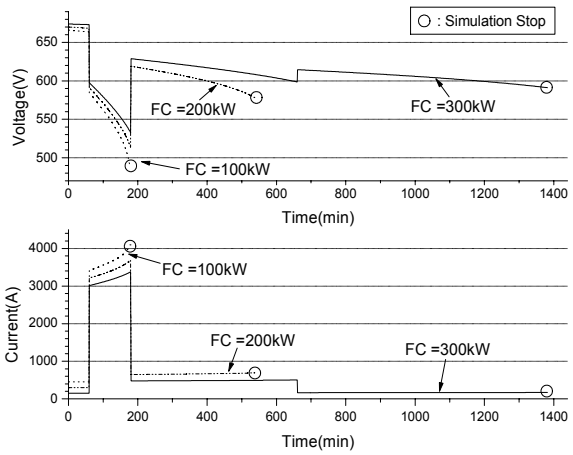

Fig. 10. Voltage and current of lead acid battery as change of fuel cell power(FC = 100 kW, 200 kW, 300 kW)

Fig. 11은 리튬폴리머전지-연료전지로 구성된 수중함용 전원체계에 있어서 부하전력이 인가되었을 때 리튬폴리머전지의 전압 및 전류의 변화를 계산한 결과이다. 납축전지와 동일하게 연료전지가 담당하는 부하가 감소할수록 리튬폴리머전지의 운용시간이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 납축전지와는 달리 부하의 급격한 변화에 따른 전압강하의 폭이 적었다. 이것은 리튬폴리머전지의 내부저항이 납축전지에 비해 작기 때문이라 판단되었다. 또한 리튬폴리머전지는 연료전지의 담당부하량에 관계없이 납축전지에 비해서는 장시간 운용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

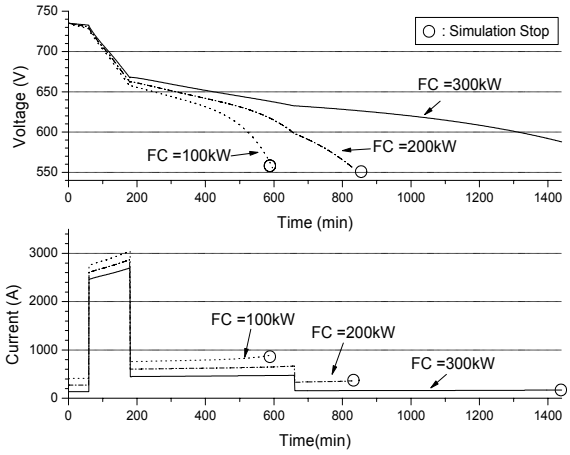

Fig. 11. Voltage and current of lithium polymer battery as change of fuel cell power(FC = 100 kW, 200 kW, 300 kW)

Table 4 ~ 6는 시뮬레이션의 결과를 정량적으로 정리한 결과로서, 연료전지 담당 부하에 따라 납축전지 및 연료전지 전원체계와 리튬폴리머전지 및 연료전지 전원체계의 에너지 분배량, SOC, 작동시간, 효율을 비교하였다.

Table 4. Fuel cell power 300 kW

	LAB+FC	LPB+FC
FC Energy	7,200.0 kWh	7,200.0 kWh
FC eff. (cell)	73.4 %	73.4 %
Bat. Energy	7,421.5 kWh	7,399.5 kWh
Bat. SOC	0.023	0.056
Stop Time	24 hrs	24 hrs

Table 5. Fuel cell power 200 kW

	LAB+FC	LPB+FC
FC Energy	31.9 kWh	2,784.0 kWh
FC eff. (cell)	75 %	75 %
Bat. Energy	6,450.0 kWh	7,774.2 kWh
Bat. SOC	0.139	0
Stop Time	9.58 hrs	13.92 hrs

Table 6. Fuel cell power 100 kW

	LAB+FC	LPB+FC
FC Energy	10.7 kWh	999.3 kWh
FC eff. (cell)	77 %	77 %
Bat. Energy	6,041.7 kWh	7,771.2 kWh
Bat. SOC	0.167	0
Stop Time	6.45 hrs	10 hrs

연료전지가 300 kW의 부하를 담당할 경우, 두 전원체계 모두 24시간 동안 수중함의 요구전력을 모두 공급할 수 있었다. 연료전지는 전지 종류에 관계없이 300 kW의 전력을 24 시간 공급하였으므로 두 전원체계에서 동일하게 7,200 kWh의 에너지를 생산하였다. 전지-리튬폴리머전지는 연료전지와 거의 동일한 에너지(전체 에너지 공급량의 51 %)를 수중함에 공급하였으며, 24시간 후의 납축전지 및 리튬폴리머전지의 SOC가 0.023, 0.056임 볼 때 대부분의 에너지를 소진하였다는 것을 확인할 수 있었다.

연료전지가 수중함의 요구전력 중 200 kW를 담당할 경우에는 연료전지가 300 kW일 경우와 대비하여 2차전지가 더 많은 부하전력을 담당하였다. 따라서 전체 운용시간 및 연료전지의 생산 전력량은 감소하였고 연료전지의 발전 효율은 증가한 것을 확인할 수 있었다. 먼저 리튬폴리머전지의 경우에는 SOC가 0가 될 때까지 에너지를 공급한 후 시뮬레이션이 정지된 것을 볼 수 있었다. 그러나 납축전지 경우에는 SOC가 0.139이였음에도 불구하고 높은 전류 인가에 따른 용량 감소로 인해 납축전지 내 잔류 에너지를 모두 사용하지 못하고 시뮬레이션이 종료된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유 때문에 납축전지-연료전지 전원체계와 리튬폴리머전지-연료전지 전원체계의 운용시간은 4.34 시간의 차이를 보였다. 또한 두 전원체계의 운용시간이 다르기 때문에 수중함에 공급한 에너지량도 차이가 있었다.

연료전지가 수중함의 요구전력 중 100 kW의 전력을 생산하여 공급하는 경우에는 연료전지가 200 kW를 담당했을 경우와 유사한 경향을 보였다. 즉 2차전지가 연료전지보다 더 많은 전력을 담당했으므로 연료전지의 생산 전력량은 감소하고 이에 따라 연료전지의 효율은 73.4 %(300 kW) → 75 %(200 kW) → 77 %(100 kW)로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 연료전지의 효율이 증가하였다는 것은 동일한 수소량을 사용하더라도 더 많은 에너지를 생산할 수 있다는 것을 의미하며, 이는 수중함 내 수소저장량을 감소시킬 수 있음을 시사한다.

시뮬레이션 종료 시점에서 납축전지의 SOC가 0.167인 것을 볼 때, 고전류로 인한 용량감소로 인하여 납축전지 내에 남아있는 에너지가 연료전지가 200 kW일 때보다 증가한 것을 볼 수 있다. 즉 납축전지의 경우 연료전지의 담당 출력이 감소할수록 납축전지의 용량감소는 증가하였다. 이에 반해 리튬폴리머전지는 상대적으로 고전류가 인가되더라도 SOC가 0이 될 때까지 지속적으로 전력을 공급할 수 있었다. 따라서 연료전지 담당 부하가 변화하더라도 리튬폴리머전지가 납축전지보다 에너지 공급 측면에서 우수한 성능을 보여줄 수 있었다.

5. 결 론

본 논문은 수중함의 에너지 요소 설계 및 운용 방법에 따라 잠항시간을 예측할 수 있는 납축전지, 리튬폴리머 전지, 연료전지 모델을 연구하였으며, 이를 바탕으로 수중함 요구전력에 따른 전원체계의 성능을 시뮬레이션 하였다.

연료전지는 2차전지의 전기화학적 특성을 보완하여 수중함의 잠항능력 향상시킬 수 있었다. 그러나 연료전지가 담당하는 부하전력이 감소할수록 납축전지의 방전전류가 증가하여 납축전지의 최대 방전가능용량은 감소하였고, 이에 따라 납축전지 내에는 사용하지 못하고 잔류하는 에너지량이 증가하였다. 즉 수중함에 납축전지 및 연료전지 전원체계가 탑재될 경우 연료전지를 통해 납축전지의 담당부하를 경감시켜 주면 수중함의 잠항 효과는 크게 개선될 수 있었다. 이에 반해 리튬폴리머전지는 인가전류에 관계없이 최대방전용량이 거의 일정하게 유지되었으므로 잔류하는 에너지 없이 대부분의 에너지를 사용할 수 있었다. 따라서 연료전지는 리튬폴리머전지에 비해 상대적으로 성능이 낮은 납축전지를 보완해 주는 것이 설치 효과 측면에서는 더 뛰어나다고 판단되었다. 이와 같은 연구결과는 향후 수중함의 전원시스템 설계나 수중함 운용자의 훈련용 시뮬레이터로 활용이 가능할 것이라 예상된다.

References

[1] H, Ji, S, Cho, “Development Direction of Military Fuel Cell”, Defense Science & Techology Plus, Vol. 122, 2011.

[2] P. C. Ghosh, U. Vasudeva, “Analysis of 3000 T Class Submarines Equipped with Polymer Electrolyte Fuel Cells”, Energy 36, pp. 3138～3147, 2011.

[3] John Buckingham, Christopher Hodge, Timothy Hardy, “Submarine Power and Propulsion - Trends and Opportunities”, Paper Presented at Pacific 2012 in Sydney, Australia, 2012.

[4] Q. Cai, D. J. L. Brett, D. Browning, N. P. Brandon, “A Sizing-Design Methodology for Hybrid Fuel Cell Power Systems and its Application to an Unmanned Underwater Vehicle”, Journal of Power Sources 195, pp. 6559～6569, 2010.

[5] H. Ji, Y. Yoo, T. Hur, S. Cho, “A Study on Fuel Cell/Secondary Battery Model for Optimal Operating Condition of Submarine Power System”, KIMST Annual Conference Proceedings, 2008.

[5] L. Guzzella, A. Sciarretta, “Vehicle Propulsion Systems,” Springer, 2005.

[6] HBL社 Catalog, www.hbl.in.

[7] Hongwen He, Rui Xiong and Jinxin Fan, “Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, Energies 4, pp. 582～598, 2011.

[8] James Larminie and Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained,” Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 2002.